



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Impacto acumulado de las actividades antrópicas en la
dinámica del cambio de cobertura y uso de tierra en los
Andes del norte del Perú: caso cuenca Mashcón**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Fernando Jefferson PRUDENCIO PAREDES

ASESORES

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Dr. Francisco Alejandro ALCÁNTARA BOZA

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Prudencio, F. (2019). *Impacto acumulado de las actividades antrópicas en la dinámica del cambio de cobertura y uso de tierra en los Andes del norte del Perú: caso Cuenca Mashcón*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geógrafo. Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE DATOS COMPLEMENTARIOS

Código Orcid del autor (dato opcional):

Código Orcid del asesor:

0000-0002-3404-412X

DNI del autor:

71244449

Grupo de investigación:

Institución que financia parcial o totalmente la investigación:

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación. Debe incluir localidades y coordenadas geográficas:

Coordenadas Geográficas:

Latitud: 6.98 ° S – 7.22 ° S; Longitud: 78.63 ° W – 78.45 ° W.

Ubicación:

Distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, Región Cajamarca.

Año o rango de años que la investigación abarcó:

1987-2016



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día Lunes 16 de diciembre del año 2019, siendo las 17:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Mg. WALTER APARICIO ARÉVALO GÓMEZ

Presidente

Ing. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUEN

Miembro

Ing. LUIS GARNICA GONZALES

Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la TESIS titulada: **“IMPACTO ACUMULADO DE LAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN LA DINÁMICA DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA EN LOS ANDES DEL NORTE DEL PERÚ: CASO CUENCA MASHCÓN”**. Presentado por el Bachiller **FERNANDO JEFFERSON PRUDENCIO PAREDES**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

APROBADO, SOBRESALIENTE (17)

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don FERNANDO JEFFERSON PRUDENCIO PAREDES.

Siendo las *18:00* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 16 de diciembre del 2019

MG. WALTER APARICIO ARÉVALO GÓMEZ
PRESIDENTE

ING. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUEN
MIEMBRO

ING. LUIS GARNICA GONZALES
MIEMBRO

DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

A Dios.

*A mis padres Juana y Fernando,
por todo el sacrificio realizado en el camino para cumplir mis sueños.*

Son mi mayor motivación.

AGRADECIMIENTOS

Antes de presentar esta tesis deseo agradecer a todas aquellas personas que con su apoyo y colaboración permitieron su desarrollo.

Primero, agradecer al **Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt)**, mediante el Proyecto: **“Influencia de los páramos en la erosión y conservación de los suelos andinos, e identificación de su rol en la regulación del recurso hídrico en grandes ciudades altoandinas”**, por el financiamiento de este trabajo de investigación y al **Instituto Geofísico del Perú (IGP)** por el apoyo en la coordinación de las campañas de campo y demás.

A mis asesores Dr. Carlos Cabrera Carranza y Dr. Alejandro Alcántara Boza por sus valiosos consejos y comentarios.

Al Dr. Sergio Morera Julca por su contribución durante el desarrollo de la tesis y haber depositado total confianza en mi persona.

A la Dra. Carolina Tovar y a la Ing. Alicia Quispe por permitirme acceder a los datos de estudios previos.

Al Msc. David Pareja y a la Ing. Stephany Callañaupa por su apoyo técnico - científico.

A mis amigos del Instituto Geofísico del Perú de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera (SCAH) por todas las facilidades prestadas en la realización de la tesis.

A mi familia: Sr. Fernando Prudencio, Sra. Juana Paredes y Srta. Leslie Prudencio por su comprensión y apoyo incondicional durante mi período como universitario y tesista.

A la familia Rojas Escudero por la ayuda incondicional, en especial a Shirley Rojas por ser la fuerza que motivó a continuar con el desarrollo de esta investigación.

Por último, pero no menos importante, a mis mejores amigos Roy Yali y César Aybar por ser la base para el desarrollo técnico de la investigación.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas Específicos	3
1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3
1.4. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	4
1.5. OBJETIVOS	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN	5
2.2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN	6
2.2.1. Principios físicos de teledetección	6
2.2.2. Conceptos radiométricos.....	8
2.2.3. Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética	10
2.3. PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	12
2.3.1. Calibración radiométrica	12
2.3.2. Ajuste Geométrico.....	13
2.3.3. Corrección atmosférica	14
2.3.4. Corrección topográfica	17
2.4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES.....	19
2.4.1. Clasificación digital multivariable orientada a objetos	19
2.4.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	20
2.4.3 Transformación Tasseled Cap (TTC).....	21
2.5. PROYECTO CORINE LAND COVER.....	22
2.6. MODELO DE CLASIFICACIÓN RAMDON FOREST.....	25
2.7. PÁRAMO O JALCA.....	26
2.8. CONTEXTO POLÍTICO-ECONÓMICO EN LOS 80'S Y 90'S	28
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	30
3.2. EDAFOLOGÍA.....	30
3.3. CLIMATOLOGÍA.....	31
3.4. ACTIVIDAD Y PRODUCCIÓN AGRÍCOLA.	32
3.5. ACTIVIDAD Y PRODUCCIÓN MINERA	35
3.6. DEMOGRAFÍA.....	36
CAPÍTULO 4: MATERIALES Y METODOLOGÍA	38
4.1. MATERIALES.....	38
4.1.1. Imágenes multiespectrales.....	38
4.1.2. Modelo de elevación digital.....	39
4.1.3. Campaña de recolección de información por tipo de cobertura y uso de tierra.....	39

4.2. METODOLOGÍA	41
4.2.1. <i>Preprocesamiento de las imágenes multiespectrales</i>	41
4.2.2. <i>Segmentación espectral</i>	45
4.2.3. <i>Generación de variables complementarias</i>	47
4.2.4. <i>Clasificación digital multivariable</i>	49
4.2.5. <i>Análisis de Cambio de Cobertura y Uso de Tierra - LUCC</i>	52
4.2.6. <i>Esquema metodológico</i>	53
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	54
5.1. PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN	54
5.2. MAPAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA	58
5.3. CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA	67
5.3. CAMBIOS Y PATRONES ESPACIALES A LO LARGO DE LA GRADIENTE DE ELEVACIÓN	80
CAPÍTULO 6: DISCUSIONES	87
6.1. EVALUACIÓN E IMPLICANCIAS DE LA METODOLOGÍA	87
6.2. ANÁLISIS DE LUCC Y PATRONES ESPACIALES	87
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	92
AGRADECIMIENTOS	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	PRINCIPALES UNIDADES DE MEDIDA EN RADIOMETRÍA.	9
TABLA 2	LEYENDA JERÁRQUICA DE COBERTURA DE TIERRA – MINAM.	23
TABLA 3	DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	38
TABLA 4	LISTA DE LAS ESCENAS LANDSAT USADAS EN LA INVESTIGACIÓN.	39
TABLA 5	RESPUESTA ESPECTRAL (REFLECTIVIDAD ESCALADA A VALORES ENTRE 0 Y 10000) PROMEDIO POR BANDA PARA $NDVI \geq 0.8$ EN SOMBRA Y SOLANA, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES.	45
TABLA 6	NÚMERO DE ÁREAS DE ENTRENAMIENTO PARA CADA IMAGEN LANDSAT.	50
TABLA 7	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 1987.	54
TABLA 8	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 1991.	55
TABLA 9	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 1996.	55
TABLA 10	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 2000.	56
TABLA 11	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 2007.	56
TABLA 12	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 2013.	57
TABLA 13	MATRIZ DE CONFUSIÓN (UNIDAD DE PÍXELES) E ÍNDICE DE KAPPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA Y USO DE TIERRA DEL AÑO 2016.	57
TABLA 14	SUPERFICIE DE COBERTURAS NATURALES Y NO NATURALES EN UNIDAD DE PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL DE LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	58
TABLA 15	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 1987 Y 2016 (UNIDAD DE HECTÁREAS).	69
TABLA 16	TABLA DE TASA DE CAMBIO ANUAL (TCA) POR TIPO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA.	69
TABLA 17	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 1987 Y 1991 (UNIDAD DE HECTÁREAS).	71
TABLA 18	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 1991 Y 1996 (UNIDAD DE HECTÁREAS).	73
TABLA 19	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 1996 Y 2000 (UNIDAD DE HECTÁREAS).	73
TABLA 20	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2007 (UNIDAD EN HECTÁREAS).	74

TABLA 21	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 2007 Y 2013 (UNIDAD EN HECTÁREAS).....	74
TABLA 22	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE LOS AÑOS 2013 Y 2016 (UNIDAD EN HECTÁREAS).....	75
TABLA 23	ÁREA POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN.	80
TABLA 24	EXTENSIÓN DE COBERTURAS NATURALES POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN.	83
TABLA 25	EXTENSIÓN DE COBERTURAS NO NATURALES POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y LA ENERGÍA DEL FOTÓN DE LA LUZ VISIBLE. EL SOL PRODUCE UN ESPECTRO CONTINUO DE ENERGÍA DESDE RAYOS GAMMA A ONDAS DE RADIO QUE BAÑAN CONTINUAMENTE A LA TIERRA EN ENERGÍA. LA PORCIÓN VISIBLE DEL ESPECTRO PUEDE MEDIRSE USANDO LA LONGITUD DE ONDA (MEDIDA EN MICRÓMETROS O NANÓMETROS, ES DECIR, O NM) O ELECTRONES VOLTIOS (eV).	7
FIGURA 2	INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE EN LA SUPERFICIE (IRRADIANCIA) Y LA ENERGÍA REFLEJADA CON DIRECCIÓN AL SENSOR (RADIANCIA).	10
FIGURA 3	EFFECTOS POR DISPERSIÓN Y ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA EN LA RADIACIÓN ATMOSFÉRICA.	11
FIGURA 4	EFFECTOS ATMOSFÉRICOS EN IMÁGENES DE SATÉLITE.	11
FIGURA 5	COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CICLO VEGETATIVO DE LOS CULTIVOS EN LAS BANDAS NIR Y EL ROJO.	21
FIGURA 6	PRINCIPIO DE CLASIFICACIÓN EN RANDOM FOREST.	25
FIGURA 7	CLASIFICACIÓN DEL PÁRAMO A LARGO DEL GRADIENTE ALTITUDINAL.	26
FIGURA 8	CORTE LONGITUDINAL DE LOS ANDES HACIA AMBOS LADOS DE LA DEPRESIÓN DE HUANCABAMBA.	27
FIGURA 9	UBICACIÓN DE LOS BIOMAS DE ALTA MONTAÑA A LO LARGO DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.	28
FIGURA 10	MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	30
FIGURA 11	DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	31
FIGURA 12	PRODUCCIÓN AGRÍCOLA ANUAL DEL DISTRITO DE CAJAMARCA (1997-2012) (GRC, 2017).	33
FIGURA 13	PRODUCCIÓN ANUAL DE CARNE DE LA REGIÓN CAJAMARCA (2001-2012) (GRC, 2017).	34
FIGURA 14	NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO VACUNO (BARRAS) Y PRODUCCIÓN LÁCTEA ANUAL (LÍNEA AZUL) DE LA REGIÓN CAJAMARCA (2000-2017) (GRC, 2017).	34
FIGURA 15	PRODUCCIÓN ANUAL DE ORO DE LA COMPAÑÍA MYSA (AZUL) Y A NIVEL NACIONAL (NEGRO) EN UNIDAD DE ONZAS (1993-2017) (MINEM, 2018).	35
FIGURA 16	PRODUCCIÓN ANUAL HORMIGÓN DEL DISTRITO DE CAJAMARCA (2004-2016) (MINEM, 2018).	36
FIGURA 17	POBLACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA (LÍNEA NEGRA), PROVINCIA DE CAJAMARCA (LÍNEA AZUL) Y EL DISTRITO DE CAJAMARCA (LÍNEA ROJA) (1940-2017) (INEI, 2018).	37
FIGURA 18	(A) DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS RECOLECTADOS EN LA CAMPAÑA DE CAMPO DEL 2016 (B-H) DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS PARA LA ETAPA DE ENTRENAMIENTO DEL MODELO CLASIFICADOR.	40
FIGURA 19	REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 MUESTRAS ALEATORIAS DE VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN TM DEL 10 DE AGOSTO DE 1987. A) IMAGEN NO NORMALIZADA Y B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA.	43
FIGURA 20	REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 MUESTRAS ALEATORIAS DE VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN TM DEL 10 DE AGOSTO DE 1987. (A) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (B) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA.	44
FIGURA 21	VARIACIÓN DEL A) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - EL MODELO DE ILUMINACIÓN) Y B) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON NDVI \geq 0.8 ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN DE LA IMAGEN TM DEL 10 DE AGOSTO DE 1987, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES.	45
FIGURA 22	IMAGEN DEL 10 DE AGOSTO DE 1987 DEL SENSOR TM EN COMPOSICIÓN DE BANDAS 4-5-3. VECTOR LINEAL <i>SHAPE_SEG</i> EN COLOR NEGRO. A) IMAGEN SIN SEGMENTAR E B) IMAGEN SEGMENTADA <i>RASTER_SEG</i> .	46

FIGURA 23	ÍNDICE DE DIFERENCIA NORMALIZADA DE VEGETACIÓN (NDVI) PARA LA IMAGEN LANDSAT OLI DEL 24 DE JULIO DE 2016 A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN (LÍNEA NEGRA).	47
FIGURA 24	TRANSFORMACIÓN ESPECTRAL TASSELED CAP PARA LA IMAGEN LANSAT OLI DEL 24 DE JULIO DEL 2016 A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN (LÍNEA NEGRA). A) ÍNDICE DE HUMEDAD - WETNESS, B) ÍNDICE DE VERDOR – GREENNESS Y C) ÍNDICE DE BRILLO – BRIGHTNESS.	48
FIGURA 25	A) MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL ALOS PALSAR 1 DE 12.5 METROS DE RESOLUCIÓN Y B) EL MODELO DE PENDIENTE EN GRADOS SEXAGESIMALES.	49
FIGURA 26	DIAGRAMA DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN ESPECTRAL DEL PRODUCTO <i>SHAPE_SEG</i> A PARTIR DE LAS ÁREAS DE ENTRENAMIENTO <i>ATRAINING</i> . ELABORADO CON LA HERRAMIENTA MODEL BUILDER DEL SOFTWARE ARCGIS 10.3.	50
FIGURA 27	ESQUEMA METODOLÓGICO.	53
FIGURA 28	EVOLUCIÓN DE CAMBIO ENTRE COBERTURAS NATURALES Y NO NATURALES. A) TENDENCIAS DE CAMBIO EN PORCENTAJE DE ÁREA TOTAL Y B) PROPORCIONALIDAD DE SUPERFICIE PARA CADA AÑO DE ANÁLISIS.	59
FIGURA 29	ESPACIALIZACIÓN DE COBERTURA NATURAL Y NO NATURAL A LO LARGO DE TODA LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN, PARA LOS AÑOS 1987, 1991, 1996, 2000, 2007, 2013 Y 2016.	59
FIGURA 30	PORCENTAJE DE CAMBIO TOTAL (PCT) PARA CADA SUB-PERÍODO ENTRE 1987-2016.	60
FIGURA 31	GRÁFICOS DE BARRAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN, PARA LOS AÑOS 1987, 1991, 1996 Y 2000; AGRUPADOS EN COBERTURAS NO NATURALES (IZQUIERDA - ROJO) Y NATURALES (DERECHA - AZUL).	62
FIGURA 32	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA PARA LOS AÑOS 1987 Y 1991.	63
FIGURA 33	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA PARA LOS AÑOS 1996 Y 2000.	64
FIGURA 34	GRÁFICOS DE BARRAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN, PARA LOS AÑOS 2007, 2013 Y 2016; AGRUPADOS EN COBERTURAS NO NATURALES (IZQUIERDA - ROJO) Y NATURALES (DERECHA - AZUL).	65
FIGURA 35	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA PARA LOS AÑOS 2007 Y 2013.	66
FIGURA 36	MAPAS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA PARA EL AÑO 2016.	67
FIGURA 37 	GRÁFICO DE BARRAS DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA ENTRE 1987 Y 2016.	68
FIGURA 38	CAMBIO DE COBERTURA HERBAZAL A OTRAS ACTIVIDADES DE ACTIVIDAD ANTRÓPICA EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	70
FIGURA 39	PORCENTAJE DE CAMBIO TOTAL (PCT) PARA CADA SUB – PERÍODO ENTRE 1987 Y 2016.	72
FIGURA 40	CAMBIO DE COBERTURA HERBAZAL, PASTOS Y BOSQUES MONTANOS A ÁREAS AGRÍCOLAS EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	76
FIGURA 41	CAMBIO DE COBERTURA AGRÍCOLA Y HERBAZALES A PASTOS EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	77
FIGURA 42	CAMBIO DE COBERTURA HERBAZAL A ÁREAS DE EXTRACCIÓN MINERA EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	78
FIGURA 43	CAMBIO DE COBERTURA AGRÍCOLA Y PASTOS A ÁREAS URBANAS EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	79
FIGURA 44	CAMBIO DE COBERTURA AGRÍCOLA Y HERBAZALES A PLANTACIONES FORESTALES EN UNIDAD DE HECTÁREAS POR AÑO, PARA CADA SUB-PERÍODO.	80
FIGURA 45	CUENCA MASHCÓN SUBDIVIDIDA POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN.	81
FIGURA 46	CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA, PARA COBERTURAS NATURALES, POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN ENTRE LOS AÑOS 1987 Y 2016.	82
FIGURA 47	CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA, PARA COBERTURAS NO NATURALES, POR INTERVALOS DE ELEVACIÓN ENTRE LOS AÑOS 1987 Y 2016.	85

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 5TM DEL 04 DE JULIO DE 1991.	101
ANEXO 2	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 5TM DEL 17 DE JULIO DE 1996.	102
ANEXO 3	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 5TM DEL 28 DE JULIO DE 2000.	103
ANEXO 4	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 5TM DEL 01 DE AGOSTO DE 2007.	104
ANEXO 5	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 8OLI DEL 13 DE JULIO DE 2013.	105
ANEXO 6	GRÁFICOS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE EL MODELO DE ILUMINACIÓN Y LA REFLECTIVIDAD DE LA BANDA DEL INFRARROJO CERCANO PARA 5000 PÍXELES CON VALORES SUPERIORES E INFERIORES AL UMBRAL DE 0.8 DE NDVI, PARA LA IMAGEN (A) NO NORMALIZADA, (B) NORMALIZADA EN LA PRIMERA ETAPA Y (C) NORMALIZADA EN LA SEGUNDA ETAPA. VARIACIÓN DEL (D) COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (REFLECTIVIDAD - MODELO DE ILUMINACIÓN) Y (E) LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (REFLECTIVIDAD) PARA COBERTURAS CON $NDVI \geq 0.8$ ANTES Y DESPUÉS A LA PRIMERA Y SEGUNDA NORMALIZACIÓN, BAJO UNA MUESTRA DE 3000 PÍXELES. IMAGEN LANDSAT 8OLI DEL 16 DE JULIO DE 2016.	106
ANEXO 7	TABLA DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE TIERRA POR RANGOS ALTITUDINALES.	107

RESUMEN

Los principales factores que aceleran la dinámica del cambio de cobertura y uso de tierra (LUCC) no están directamente relacionados con el cambio climático, sino principalmente con las actividades de producción-extracción y el crecimiento de la población. Situación que afecta a las regiones de montaña tropical como la cuenca Mashcón ($\sim 311\text{km}^2$), ubicada al norte de la cordillera de los Andes superiores del Perú y oeste de la cabecera de cuenca del Amazonas; que alberga a la ciudad de Cajamarca, una de las más pobladas de las elevadas alturas de los Andes peruanos. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es el análisis de LUCC, a escala de tiempo intradecadal (3-7 años), empleando siete escenas satelitales, entre las Landsat 5TM y 8OLI, durante la temporada seca (julio-agosto) para el período 1987-2016. Es así que los distintos tipos cobertura y uso de tierra se caracterizan, espacial y temporalmente, a través del modelo Random Forest como clasificador multivariable orientado a objetos. Los resultados de LUCC muestran principalmente un aumento drástico en extensión de coberturas como: la agricultura (63.8km^2), pastos (17.2km^2), minería (12km^2), plantación de árboles (9.5km^2) y área urbana (8.3km^2); desplazando áreas de cobertura natural como las herbazales (-107.7km^2), bosques montanos (-1.9km^2), Jalca (-0.8km^2) y matorrales (-0.4km^2). Además, las tasas de cambio anual (TCA) de $-2.15\%/año$ (1987-2016) para las coberturas naturales y $+ 3.2\%/año$ para áreas intervenidas, evidencian el impacto acumulado de la actividad humana como consecuencia de la sobreexplotación de recursos en los distintos sectores económicos.

Palabras clave: LUCC, Landsat TM-OLI, Intradecadal, Random Forest, Clasificación orientada a objetos y TCA.

ABSTRACT

The main factors that accelerate the dynamics of land cover and land use change (LUCC) are not directly related to climate change but mainly to production-extraction activity and population growth. This situation affects tropical mountain regions, for instance Mashcon catchment ($\sim 311\text{km}^2$), located north upper Andes mountain of Peru and west of the headwaters of the Amazon basin; which houses the city of Cajamarca, one of the most populated of the high elevations of the Peruvian Andes. Therefore, the main objective of this research is the LUCC analysis, at the intradecadal (3-7 year) scale, of the study area using seven Landsat 5TM and 8OLI images during dry season (July-August) for the period 1987-2016. Land cover and land use types have been spatially and temporally characterized with the help of the Random Forest model as an object-oriented multivariable classifier. The results of the LUCC in the watershed mainly showed a drastic increase in the area of agriculture, (63.8km^2), pasture (17.2km^2) mining (12km^2), tree plantation (9.5km^2) and urban area (8.3km^2), displacing areas of natural land cover such as herbaceous (-107.7km^2), montane forest (-1.9km^2), Jalca (-0.8km^2) and shrubland (-0.4km^2). Moreover, the annual rate of change (TCA) of $-2.15\%/yr$ (period of study) for natural land cover and $+3.2\%/yr$ for intervened land; evidence the impact of human activity as a consequence of the overexploitation of nature resources in the different economic sectors.

Key words: LUCC, Landsat TM-OLI, Intradecadal, Random Forest, Object-oriented classification and TCA.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Este estudio refiere al análisis del impacto de la actividad humana en la dinámica del cambio de cobertura y uso de tierra (LUCC) en condiciones de montaña tropical, en el noroeste de los Andes del Perú. Esta zona, además de su relación con la cuenca occidental del Amazonas, se caracteriza por su diversidad edáfica y ecosistémica (**Brooks et al., 2006; Kruckeberg & Rabinowitz, 1985**). Asimismo, se destaca el ecosistema Jalca ubicada por encima de los 3000 m de altitud, ofertante de servicios naturales complejos como el suministro continuo del recurso hídrico (**Körner & Spehn, 2002**).

La importancia principal de esta investigación radica en la escala de tiempo intradecadal (3-7 años) para la cual se calculan los indicadores de cambio. Además, la escalabilidad de la metodología permite replicarla en áreas con similares condiciones. Por lo tanto, sus resultados contribuyen a identificar el comportamiento del LUCC y los posibles desplazamientos ascendentes a lo largo del gradiente de elevación de cada tipo de cobertura y uso de tierra para el período 1987-2016. Por lo tanto, se concluye que una mejor precisión temporal en el análisis contribuye a identificar de manera correcta el factor natural y/o socioeconómico que causan los cambios.

Por lo tanto, para analizar el problema del acelerado LUCC es necesario mencionar los factores que posiblemente los causan. Algunos autores han sugerido que existe un desplazamiento ascendente de ciertos biomas de montaña debido al cambio climático (**Peñuelas & Boada, 2003**). Sin embargo, estudios como el “Estudio Especializado de Análisis de los Cambios en la Cobertura y el Uso de la Tierra” (EE-LUCC) (**GRC, 2014**) y el de **Tovar, Seijmonsbergen, & Duivenvoorden (2013)** muestran que estos cambios se deben principalmente a factores relacionados con la actividad antropogénica en los distintos sectores económicos en la región. Uno de ellos es el aumento de la población del año 1981 (0.06 mill. Hab.) al 2015 (0.23 mill. Hab.) (**INEI, 2018**), motivado por el auge minero de la década de 1990 que generó la migración poblacional de regiones cercanas (**Castillo & Brereton, 2018**). Los dos estudios mencionados basaron sus investigaciones en dos años puntuales (año inicial y final), pero ninguno evaluó la posibilidad de un análisis en escalas de tiempo cortas que conduzcan a una mejor comprensión de la dinámica del LUCC en los últimos treinta años. Teniendo en cuenta que, como mínimo, se consideran necesarios períodos de entre tres y cinco años para un monitoreo óptimo de LUCC (**John R Jensen & Cowen, 1999**).

El principal desafío para nuestro análisis espacio-temporal de LUCC fue lidiar con la naturaleza heterogénea de la cubierta terrestre y las condiciones meteorológicas que definen los Andes noroccidentales del Perú (**FAO, 2013**). Por esa razón, las nuevas tecnologías, como los dispositivos de detección remota, son la principal fuente de datos multiespectrales para el mapeo de la cobertura terrestre, y desde 1972, Landsat ha proporcionado imágenes para el análisis de LUCC, lo que la convierte en la serie más larga de datos satelitales de resolución media que existen (**USGS, 2016**). Con esta fuente de datos disponible, el enfoque de clasificación se convierte en el factor determinante para el éxito de la metodología. Todo algoritmo de clasificación digital supervisada basa su análisis en unidades de estudio etiquetadas como representativas de un determinado tipo de cobertura terrestre. Siendo el enfoque de clasificación estándar el análisis de píxeles individuales. Sin embargo, esto no es apropiado para la cartografía de coberturas terrestres estrictamente heterogéneas. Por esa razón, un análisis basado en grupos de píxeles (objetos) espectralmente homogéneos es más útil en regiones de gran altitud (**GRC, 2014; Tovar et al., 2013; Vega, Hirata, Ventura, & Serrudo, 2018**). Dando, por último, la responsabilidad de una etapa de entrenamiento óptima al modelo de clasificación. Sin dejar de mencionar que los clasificadores multivariantes de aprendizaje automático como Random Forest, redes neuronales y árboles de decisión son algunos de los algoritmos más desarrollados para la clasificación de la cobertura terrestre (**Vega et al., 2018**).

Por lo tanto, el enfoque principal de este estudio es el desarrollo de una categorización coherente y el análisis de los factores que motivan la aceleración del LUCC para preparar estrategias con fines de conservación de los recursos naturales en las cabeceras de cuencas hidrográficas altoandinas.

1.1. Situación Problemática

Actualmente el paisaje natural altoandino está bajo la presión de las actividades antrópicas. Según **Tovar et al. (2013)** y el EE-LUCC (**GRC, 2014**) se muestran considerables pérdidas de espacios naturales en la región Cajamarca - Perú, desde un panorama general. Sin embargo, estudios con un adecuado análisis y cuantificación de LUCC a escala de tiempo intradecadal (3-7 años) son inexistentes para el área en mención. Sin tener en cuenta la gran importancia de la necesidad de entender el comportamiento natural y/o inducido de las coberturas terrestres. Quedando como evidencia que a falta de datos que demuestren las causas principales de la dinámica del

LUCC en estas zonas, el deterioro de los servicios ecosistémicos que brindan son asociados, en algunos casos, al “cambio climático” y no a otros factores aún más relevantes.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo la presión de las actividades antrópicas acelera la dinámica del cambio de cobertura y uso de la tierra (LUCC) en la cuenca del río Mashcón?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo la actividad minera ha impactado en la extensión de las coberturas de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016?
- ¿Cómo la actividad agrícola y las plantaciones forestales han impactado en la extensión de la cobertura de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016?
- ¿Cómo la expansión urbana ha impactado en la extensión de la cobertura de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016?
- ¿Cómo las coberturas naturales y/o inducidas se desplazaron a lo largo de la gradiente de elevación en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016?

1.3. Justificación teórica

- Esta investigación es relevante porque aportará al conocimiento geoespacial histórico acerca del impacto de la actividad extractivo – productiva en áreas de paisaje natural.
- A partir de la información generada, se tomarán decisiones de carácter de gestión de cuencas tanto a nivel local como regional, así como identificar las zonas prioritarias para la conservación e incluirlo dentro de la elaboración del Plan de Ordenamiento Territorial (POT).
- Los resultados contribuirán socialmente en la toma de conciencia por parte de la población urbano–rural cajamarquina para la conservación de áreas vulnerables ofertantes de servicios ecosistémicos.
- La escala de tiempo empleada para el análisis de esta investigación marcará relevancia en posteriores estudios de cambio de cobertura a nivel nacional, ya que permite comprender, detalladamente, la relación de su dinámica con el contexto político – económico del país. Factor que está vinculado al conflicto por la tenencia de tierras en los Andes peruanos debido a los recursos que albergan.

1.4. Justificación técnica

- La aplicación de la corrección topográfica reducirá los efectos de las sombras en las escenas, homogenizando espectralmente los píxeles de coberturas similares, siendo esta la base para una óptima clasificación digital.
- Debido a la heterogeneidad de cobertura en el área de estudio, la clasificación basada en objetos, la cual tiene su origen en la agrupación de píxeles con características espectrales homogéneas, será la que contribuya principalmente en la generalización de los distintos tipos de coberturas.
- El análisis de la dinámica de LUCC expondrá el impacto de las actividades productivas y extractivas. Contribuyendo con un metodología meramente cuantitativa y comparativa.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Cuantificar y describir el impacto de las actividades antrópicas en la dinámica del cambio de cobertura y uso de la tierra (LUCC) en la cuenca del río Mashcón, a escala de tiempo intradecadal (3-7 años) entre 1987 y 2016.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar el impacto de la expansión de la actividad minera en la extensión de las coberturas de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016.
- Analizar el impacto de la expansión agrícola y plantación forestal en la extensión de las coberturas de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón entre los años 1987-2016.
- Analizar el impacto de la expansión urbana en la extensión de las coberturas de paisaje natural en la cuenca del río Mashcón.
- Analizar el desplazamiento de las coberturas naturales y/o inducidas a lo largo de la gradiente de elevación en la cuenca del río Mashcón para el período 1987-2016.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Bajo el marco de una adecuada gestión del territorio, en la actualidad, existen estudios relacionados al diagnóstico del estado actual de la cobertura/uso de tierra y el análisis de cambios de los mismos. De los cuales, destacan los siguientes:

La Zonificación Ecológica Económica (ZEE), presentada por el Gobierno Regional de Cajamarca (**GRC, 2011**), comprende la delimitación de áreas con características homogéneas. Además, basándose en ellas identifica alternativas para el uso sostenido del territorio, en coherencia con las limitaciones y potencialidades de la región. Por último, este proceso concluye en la identificación de áreas con vocación para la actividad pecuaria, agrícola, pesquera, protección y conservación de ecosistemas frágiles, forestal, ecoturismo, minera, industrial, energética, urbano y otras.

El Estudio Especializado de Cambio de Cobertura y Uso de Tierra (EE-LUCC), elaborado por el **GRC (2014)**, cuantifica la dinámica y sustenta las principales causas y efectos que generaron estos cambios para el período 2001 - 2013. Asimismo, identifica y delimita zonas de tratamiento especial que permitan la gestión de conservación de ecosistemas vulnerables a través del aprovechamiento sostenible del territorio.

Tovar, Duivenvoorden, Sánchez-Vega, & Seijmonsbergen (2012) evalúa la importancia de los cambios en el tiempo a través de las características de los parches en la diversidad y composición de las especies de los páramos al norte del Perú, un ecosistema tropical de pasturas localmente conocido como jalca.

Tovar et al. (2013) analizan el cambio del paisaje en una región de montaña, con la finalidad de orientar la gestión de conservación mediante la inclusión de: análisis del LUCC, tendencias del LUCC respecto a la gradiente de elevación y cambios en la configuración espacial. Esta investigación se desarrolla en las praderas peruanas conocidas como Jalca (> 3000 msnm), ubicado en los Andes Tropicales para el período 1987 - 2007.

Llerena, Hermoza, & Llerena (2007) describe históricamente a nivel regional, nacional y mundial la expansión masiva de plantaciones de especies forestales y analiza la disyuntiva que existe en la expansión de este tipo de cobertura con fines productivos, protección o servicios ambientales en escenarios de escasa oferta hídrica.

Owen, Morelli, & Hernández (2007), Este informe del Centro de Inversiones de la FAO ha sido preparado en el marco del Programa de Cooperación FAO/Banco Mundial. El objetivo principal de la misión fue de evaluar el potencial que tiene la formación de consorcios o asociaciones para impulsar la reforestación en la sierra. Donde indica que actualmente los agricultores están ganando títulos o quieren pertenecer a una forma tradicional de tenencia (tierras comunales) o cooperativas.

Krois & Schulte (2014) presenta una metodología para identificar y clasificar áreas potenciales para la conservación del suelo y el agua en la sub-cuenca Ronquillo, en los Andes del norte del Perú. Esta metodología tiene en cuenta los criterios de evaluación ambiental y un método de toma de decisiones conocido como Proceso de Jerarquía Analítica, donde los datos espaciales se procesan aplicando un sistema de información geográfica y las áreas potenciales se clasifican mediante una evaluación multicriterio basado en factores meteorológicos, topográficos, hidrológicos, agronómicos y pedológicos.

Por último, **Castillo & Brereton (2018)** explora procesos migratorios motivados por la actividad extractiva a través de un estudio de caso del proyecto minero de cobre La Granja en la región de Cajamarca, Perú. El documento relaciona estos hallazgos con debates más amplios sobre la naturaleza de los procesos migratorios en Perú y aboga por que se preste mayor atención a las dinámicas de movilidad al analizar los impactos sociales de los proyectos mineros.

2.2. Fundamentos físicos de teledetección

2.2.1. Principios físicos de teledetección

a. Mecanismos de transmisión de energía

La transferencia de energía se puede representar mediante tres mecanismos: (1) por conducción, a través de la interacción entre partículas atómicas cuando dos o más cuerpos están en contacto. (2) por convección, cuando la energía cinética, propia de los cuerpos en movimiento, es transferida de un cuerpo a otro y (3) por radiación, cuando la energía es emitida y posteriormente absorbida por distintos cuerpos a manera de haces electromagnéticos.

En el campo del sensoramiento remoto, el mecanismo de transferencia de energía más importante es la radiación debido a que es la única forma de transferencia de energía que puede tener lugar en el sistema sol-tierra-sensor (**J R Jensen, 2000**).

b. Espectro electromagnético

“El flujo radiante detectado por los sensores remotos es descrito como la condición de una región o regiones del espectro electromagnético” (Slater, 1980). El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos pasando por longitudes de onda cortas, radiofrecuencias bajas y longitudes de onda largas (Figura 1).

En teledetección óptica, la energía es comúnmente captada entre la región del espectro visible y la región del infrarrojo medio ($0.4\ \mu\text{m}$ - $3\ \mu\text{m}$). Las regiones del infrarrojo termal ($3\ \mu\text{m}$ - $15\ \mu\text{m}$) son usadas por sistemas radiométricos para la captura de la energía emitida de los cuerpos sobre la superficies o artefactos en la atmósfera.

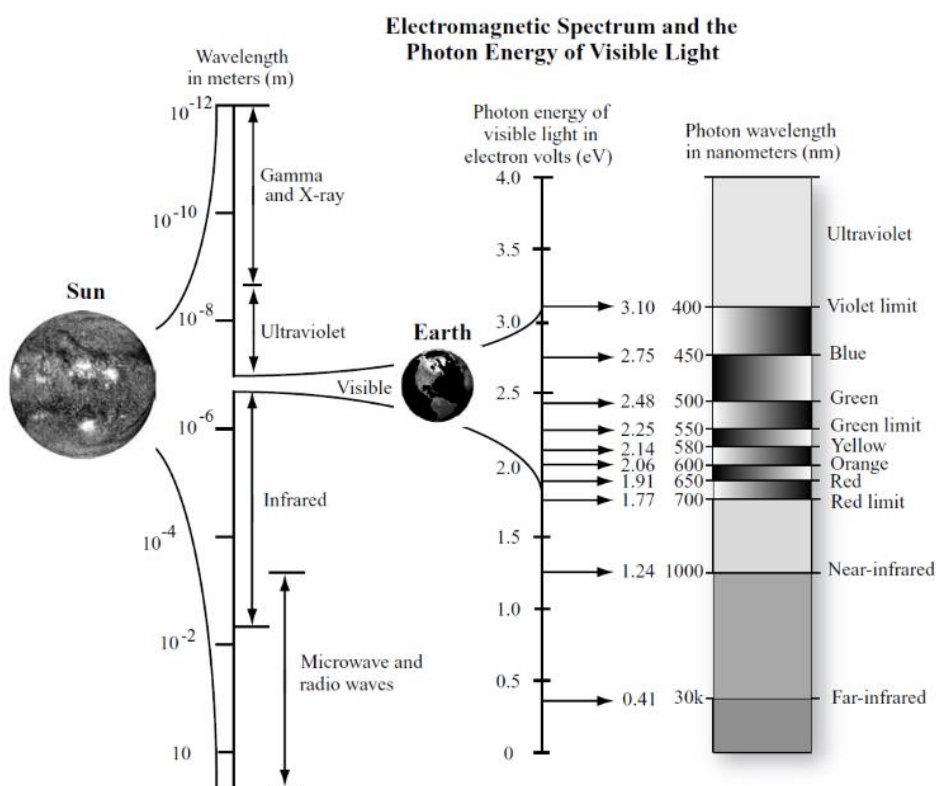


Figura 1] El espectro electromagnético y la energía del fotón de la luz visible. El Sol produce un espectro continuo de energía desde rayos gamma a ondas de radio que bañan continuamente a la Tierra en energía. La porción visible del espectro puede medirse usando la longitud de onda (medida en micrómetros o nanómetros, es decir, o nm) o electrones voltios (eV).

Fuente: J R Jensen (2000).

La radiación en el espectro visible es con el que estamos más familiarizados, ya que percibimos la realidad a través de la energía que reflejan en esta región. Asimismo, los artefactos en la atmósfera (nubes) y los diferentes tipos de cobertura en la superficie (suelo desnudo, roca expuesta, glaciares, vegetación, áreas urbanas, etc.) absorben, transmiten y reflejan energía en distintas proporciones a lo largo de espectro

electromagnético. En conclusión, cada una de estas coberturas son espectralmente distintas por la cantidad de energía que reflejan, siendo posible analizar los datos capturados a través de las imágenes satelitales y plantear hipótesis precisas acerca de una cobertura por el comportamiento de su firma espectral.

2.2.2. Conceptos radiométricos

Tradicionalmente, los conceptos radiométricos empleados en teledetección han sido motivo de frustración y confusión, más aún cuando una gran cantidad de términos son empleados para describir lo mismo o cambian su nombre dependiendo del contexto en el que se emplean.

En este apartado son presentadas algunas de las principales definiciones de radiometría con las que se aconseja se debe de estar familiarizado para el correcto uso de los términos. Sin embargo, frecuentes actualizaciones son presentadas y/o reguladas por las comisiones internacionales en temas de radiación, las cuales se sugiere consultar con periodicidad. En la **Tabla 1** se listan los principales términos y unidades de medida básicos para el entendimiento de la naturaleza física que encierran los niveles digitales grabados por los sensores (Slater, 1980).

Para que la observación remota se produzca, es necesario que el sensor óptico capture la energía reflejada desde la superficie terrestre. La intensidad de dicha energía es medida por unidad de superficie y dirección. Entonces, es necesario dar a conocer las unidades de medida más usadas en teledetección óptica, con el objetivo de ser rigurosos al momento de presentar los procesos de adquisición de un producto o resultado, estos son:

- **Energía Radiante (Q)**. Hace referencia al total de energía reflejada en todas las direcciones. Es medida en julios (J).
- **Flujo radiante (ϕ)**. Hace referencia al total de energía reflejada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Es medida en vatios (W).
- **Emitancia o exitancia radiante (M)**. Hace referencia al total de energía reflejada en todas las direcciones por unidad de área y unidad de tiempo. Es medida en vatios por metro cuadrado ($W.m^{-2}$).
- **Irradiancia ($ESUN$)**. Hace referencia al total de energía incidente sobre la superficie por unidad de área y unidad de tiempo. Es medida en vatios por metro cuadrado ($W.m^{-2}$).

- **Intensidad radiante (I)**. Hace referencia al total de energía reflejada por unidad de tiempo y ángulo sólido (Ω). Este ángulo tridimensional refiere a la sección de la energía reflejada, midiéndose en estéreo-radianes. Es así que esta unidad es medida en vatios por estéreo-radián ($W \cdot sr^{-1}$).
- **Radiancia (L)**. Hace referencia al total de energía reflejada por unidad tiempo, área y ángulo sólido. Es un término importante en el campo de la teledetección óptica, ya que refiere a lo medido por el sensor. Es media en vatios por metro cuadrado y estéreo-radián ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$).
- **Radiancia espectral (L_λ)**. Es la radiancia media por rangos de longitudes de onda. Al igual que la radiancia, la irradiancia y emitancia pueden complementarse con el calificativo de espectral (con el subíndice λ) para hacer referencia a un rango de longitudes de onda determinado.
- **Reflectividad (ρ_λ)**. Refiere a la relación entre radiancia y la irradiancia espectral, carece de unidad de medida y varía en el rango de 0 a 1.
- **Absortividad (α)**. Relación entre la energía absorbida y la irradiancia espectral.
- **Transmisividad (τ)**. Relación entre la energía transmitida y la irradiancia espectral.

Tabla 1] Principales unidades de medida en radiometría.

Fuente: Slater (1980).

Unidad	Símbolo	Ecuación	Unidades utilizadas	Abrev. Unidades
Energía Radiante	Q	-----	Julios Ergios Kilovatio hora	J Erg KWh
Irradiancia	$ESUN$	$ESUN = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	Vatio (Watt) por metro cuadrado	$W \cdot m^{-2}$
Radiancia	L	$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \cos \theta \partial \Omega}$	Vatio (Watt) por metro cuadrado y estereorradián	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
Emitancia Radiante	M	$M = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	Vatio (Watt) por metro cuadrado	$W \cdot m^{-2}$
Reflectividad	ρ	$\rho = \frac{\Phi_{reflejada}}{\Phi_{incidente}}$	Adimensional	-----

De los términos mencionados, tanto la reflectividad, absortividad y transmisividad son adimensionales y se expresan en porcentaje o en el rango de valores entre 0 y 1. Es por esta razón que a estos términos se les añade el sufijo <<ividad>>, y así indicar que estas cantidades son relativas. Por otro lado, a los términos que representan cantidades

absolutas se les añade el sufijo <<ancia>>. De ambas cantidades, si son dependientes de la longitud de onda, es conveniente complementarlas con el término espectral, para así referirse a su comportamiento peculiar en un rango de longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético.

Entonces, para el estudio de la radiometría en sensores remotos evaluaremos dos componentes relativos a la ubicación del área a monitorear (iluminación y observación), los que a su vez están en función a la posición sol y del satélite respecto al punto “P” en la superficie y bajo la normal “N” (**Figura 2**).

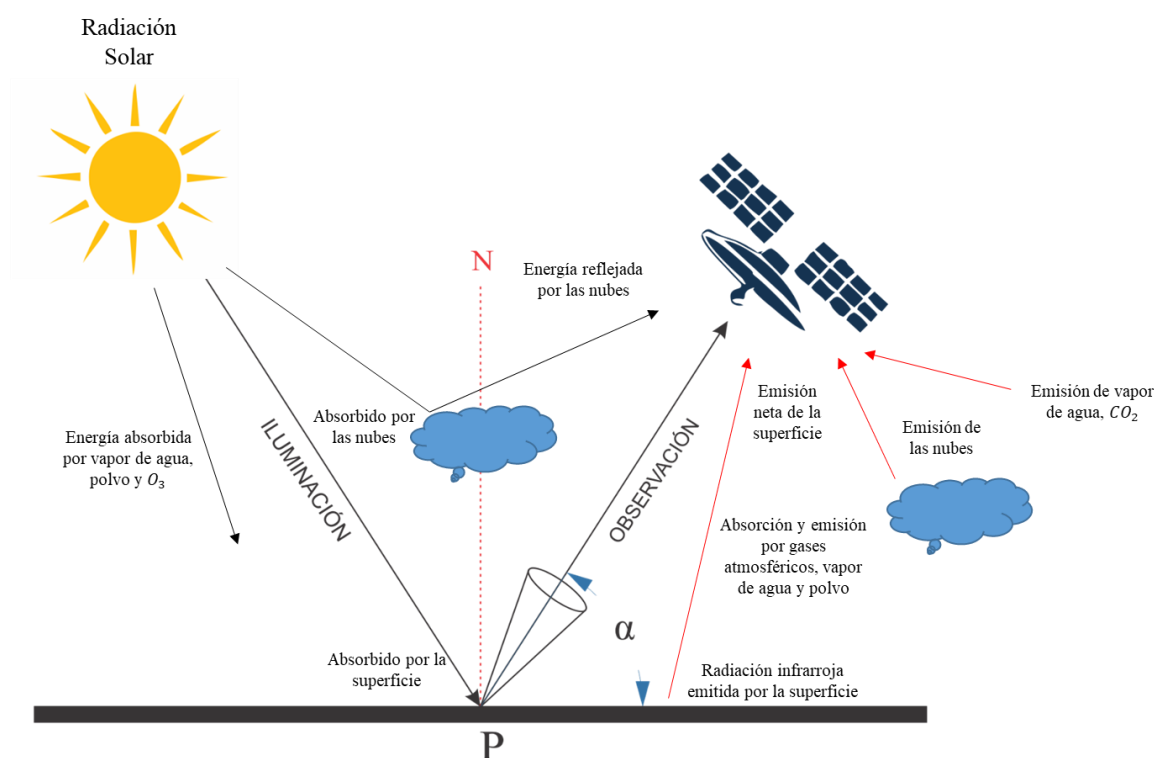


Figura 2| Interacción de la radiación incidente en la superficie (Irradiancia) y la energía reflejada con dirección al sensor (Radiancia).

Fuente: Elaboración propia.

Por último, cuando analizamos la radiación incidente bajo el sistema sol-tierra se emplea el término irradiancia, mientras que bajo el sistema tierra-sensor se emplea el término radiancia, la cual es una particularidad de la emitancia en una sola dirección, y cuando se analiza la relación entre la energía reflejada con dirección al sensor (radiancia) y la energía entrante se le denomina reflectividad.

2.2.3. Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética

En este apartado se describe la interacción entre la trayectoria que sigue la radiación durante su paso por la capa atmosférica.

Debido a la presencia de componentes en la atmosfera, tal como el vapor de agua y aerosoles, la radiación electromagnética (incidente y reflejada) es altamente afectada por los efectos de dispersión (scattering), absorción (absorbing) y refracción (refracting) en distintos rangos de longitudes de onda (**Figura 3**). Por lo tanto, esta interacción dificulta la percepción remota de la superficie terrestre.

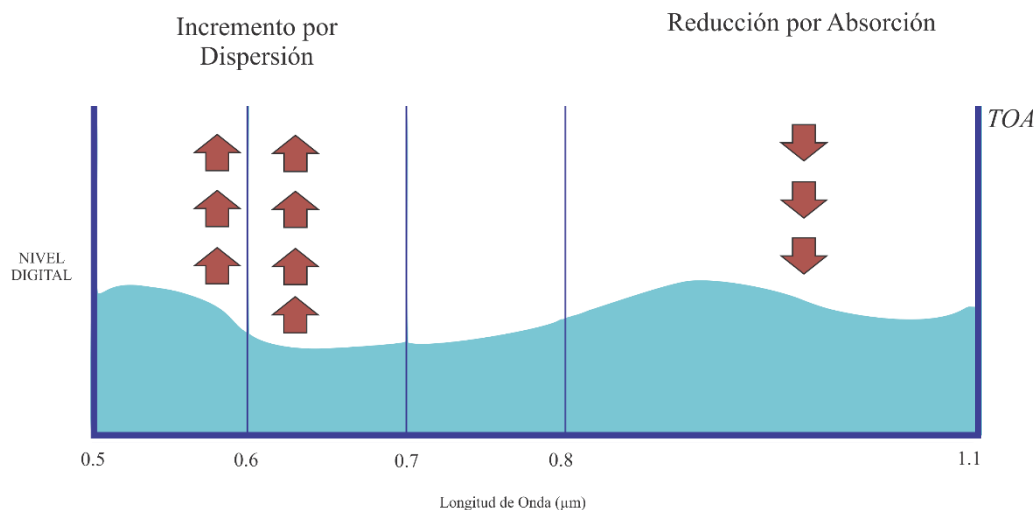


Figura 3] Efectos por dispersión y absorción atmosférica en la radiación atmosférica.

Fuente: Jensen (1996).

En conclusión, el efecto atmosférico se traduce en el incremento del valor del nivel digital para las longitudes de onda cortas como consecuencia de procesos de múltiple dispersión y una reducción de los mismos para las longitudes de onda larga como consecuencia de procesos de absorción. Dichos efectos, se pueden detallar haciendo las siguientes consideraciones para los procesos mostrados en la **Figura 4**.

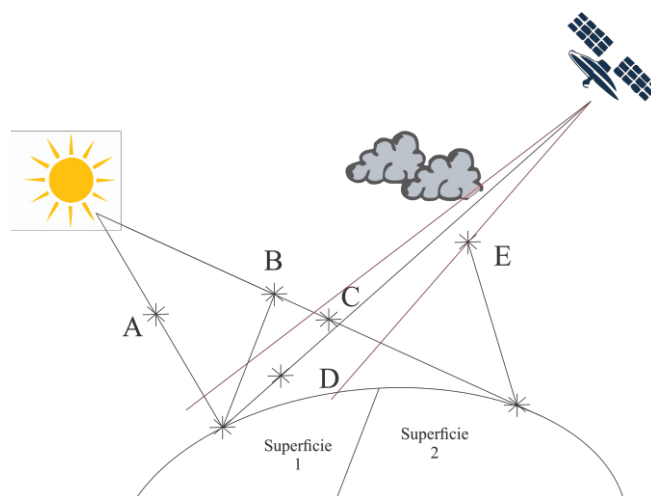


Figura 4] Efectos atmosféricos en imágenes de satélite.

Fuente: Guzman (2005).

Donde:

A, es la absorción de la radiación incidente; B, es la dispersión de la radiación incidente con dirección a la superficie; C, es la dispersión de la radiación incidente con dirección al sensor; D, es la dispersión de la energía reflejada con dirección sensor; E, es la radiación emitida por la superficie con dirección al sensor.

Por último, estos efectos deben de simularse mediante el empleo de modelos de transferencia radiativa, por lo que en el apartado de correcciones atmosféricas se definirán algunos principios generales. Detalles acerca de la descripción de cada uno de los flujos mencionados anteriormente pueden encontrarse en **Gonima (1993)**.

2.3. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

2.3.1. Calibración radiométrica

Esta primera etapa del pre-procesamiento hace referencia al cálculo de variables físicas, para cada pixel, a partir de los niveles digitales (ND) de una imagen satelital sin calibrar. Por lo tanto, este paso resulta crucial durante el análisis, interpretación y comparación de imágenes de distintos sensores, o del mismo, a lo largo de un período de tiempo.

Entonces, de lo mencionado anteriormente, el objetivo principal es obtener los valores de reflectividad aparente o a nivel de la capa superior de la atmósfera (TOA) a partir de coeficientes de calibración incluidos dentro de los metadatos de la imagen (**Ecu. 1**) (**IGAC -CIAF, 2013**).

Es necesario resaltar que los valores de reflectividad TOA son adimensionales y tienen un rango de variación entre 0 y 1.

$$\rho_{\lambda ij} = \frac{(ND_{\lambda ij} \times M_{\rho}) + A_{\rho}}{\cos(\theta)} \dots (\text{Ecu. 1})$$

Donde:

$\rho_{\lambda ij}$ corresponde a la reflectividad TOA para el $pixel_{ij}$ en la banda λ ; $ND_{\lambda ij}$ es el nivel digital para cada $pixel_{ij}$ en la banda λ ; M_{ρ} y A_{ρ} son los factores multiplicativo y aditivo respectivamente para cada banda λ y θ es el ángulo cenital solar.

Sin embargo, para los datos Landsat 5TM y 7ETM, en algunos casos, es necesario obtener primero la radiancia espectral (**Ecu. 2**) a partir de los coeficientes de calibración específicos para cada sensor (**Chander, Markham, Helder, & Ali, 2009**). Esto debido a la ausencia de los factores multiplicativos y aditivos en los metadatos.

$$L_{\lambda ij} = (ND_{\lambda ij} \times G_{\lambda}) + B_{\lambda} \dots (\text{Ecu. 2})$$

Donde:

$L_{\lambda ij}$ es la radiancia espectral para el $pixel_{ij}$ en la banda λ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$); los coeficientes de calibración están representados por $B_{\lambda ij}$ y $G_{\lambda ij}$ (sesgo y ganancia) para cada banda λ . Por último, $ND_{\lambda ij}$ es el nivel digital para cada pixel en la banda λ .

En definitiva, seguido a la obtención de la radiancia espectral le sigue el cálculo reflectividad TOA (**Ecu. 3**), siendo esta la relación entre la energía reflejada (radiancia) y la incidente (irradiancia) (**Chander et al., 2009**).

$$\rho_{\lambda ij} = \frac{\pi \times L_{\lambda ij} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta)} \dots (Ecu. 3)$$

Donde:

$\rho_{\lambda ij}$, corresponde a la reflectividad TOA para el $pixel_{ij}$ en la banda λ ; $L_{\lambda ij}$ es la radiancia espectral para el $pixel_{ij}$ en la banda λ ; d es la distancia tierra-sol, en unidades astronómicas, al momento del registro de la escena; $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia espectral para cada banda λ y θ es el ángulo cenital solar.

2.3.2. Ajuste Geométrico.

Durante el análisis multitemporal es necesario que las escenas utilizadas se ajusten con gran precisión y detalle. De otro modo se detectaría como pseudo-cambios a lo que es el resultado de un mal ajuste geométrico entre las matrices de las imágenes.

El ajuste geométrico consiste en la transformación de las coordenadas de los píxeles de una imagen para coincidir de manera precisa con otra de referencia. Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo o tercer grado (dependiendo de la cantidad de puntos) que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control homólogos ubicadas en ambas imágenes. Este proceso de selección de pares homólogos resulta menos complicado que la corrección geométrica, ya que rasgos comunes como características peculiares de la cobertura vegetal, intersección de infraestructura vial o hidrográfica, visibles en las escenas, pero no geolocalizables en campo. Ahora, la elección de la ubicación de los puntos de control dependerá de la resolución espacial de las imágenes.

Sin embargo, se ha demostrado que para ajustes geométricos inferiores al 100% de la dimensión del pixel, puede llegarse hasta un 50% de pseudo-cambios debido a una pobre precisión en el proceso (**Townshend, Justice, Gurney, & McManus, 1922**). Para esto, varios autores sugieren precisiones de ajuste superiores al 20% de la dimensión del píxel para asegurar un error inferior al 10% en la comparación temporal (**Dai & Khorram, 1998; Townshend et al., 1922**).

Por último, para el ajuste de varias escenas resulta interesante la selección semiautomática de puntos de control. Esto a partir de una kernel móvil en torno al punto ubicado en la imagen referencia. Entonces el punto homólogo se obtiene por correlación entre valores radiométricos de matrices kernel en las dos imágenes (**Diez de Arribas & Nicolás, 2001**).

2.3.3. Corrección atmosférica

A menudo, el registro de las imágenes satelitales de sensor óptico se da bajo condiciones heterogéneas en la capa atmosférica, con distintas concentraciones de vapor de agua y aerosoles, los cuales generan el ruido espectral. Es entonces que una adecuada corrección atmosférica es necesaria para reducir estos efectos causados al flujo radiante capturado por el sensor. Las ventajas de este tipo de corrección las menciona **Richter (1996)** en la siguiente lista:

- Remueve total o parcialmente los efectos de la influencia atmosférica y del ángulo de incidencia solar en la imagen.
- Mejora la precisión del cálculo de las cantidades físicas de reflectividad a nivel de superficie.
- Mejora el análisis comparativo de imágenes en un período de tiempo, las cuales fueron registradas bajo distintas condiciones atmosféricas.
- Optimiza la detección de cambios y los modelos de clasificación digital.

A continuación, se presentan algunos de modelos de corrección atmosféricas basado en la imagen de transferencia radiativa:

▪ **Dark-Object Subtraction (DOS)**

También conocido como método de Chavez. Esta corrección está basada en los valores intrínsecos de los píxeles en la imagen, para disminuir únicamente los efectos de la dispersión atmosférica (scattering). Sustrayendo un valor de turbidez inicial (Starting Haze Value - SHV) estimado a partir del histograma de la banda azul y posteriormente calculado proporcionalmente para otras bandas espectrales en base a factores presentados por **Chavez (1988)**, según las condiciones de turbidez de la atmósfera al momento del registro de la escena. Es así que se obtiene como resultado un histograma espectral de bandas desplazado a la izquierda.

▪ **Quick Atmospheric Correction (QuAC)**

Es un método de corrección atmosférica de imágenes multispectrales e hiperspectrales que trabaja con el rango de longitud de onda visible e infrarrojo cercano (NIR) a través del infrarrojo de onda corta (SWIR).

QuAC determina parámetros de corrección atmosféricas directamente de los espectros de píxel observado en una escena, sin información auxiliar. Realizando una corrección

atmosférica más aproximada que otros métodos basados en la física de la atmósfera, generalmente produciendo espectros de reflectividad en el intervalo de aproximadamente el 10% de la realidad del terreno (**Bernstein, Jin, Gregor, & M., 2012**).

Se basa en el hallazgo empírico de que la reflectividad media de diversos espectros de contenido (excepto materiales altamente estructurados como la vegetación, aguas poco profundas, y el barro) no dependiente de la escena. Haciendo que el tratamiento sea más rápido en comparación con otros. QuAC también permite cualquier ángulo de visión o ángulo de elevación solar. Si un sensor no tiene calibración radiométrica o longitud de onda apropiada, o si la intensidad de la iluminación solar es desconocida (con capas de nubes, por ejemplo), ya que aun así puede recuperar espectros de reflectividad razonablemente precisos, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Hay al menos 10 materiales diversos en una escena.
- Hay suficientemente píxeles oscuros en una escena para permitir una buena estimación del espectro de la línea de base.

El software ENVI v5.3 pone a disponibilidad este algoritmo. Esta aplicación contiene las siguientes mejoras para llegar a una óptima precisión de la corrección atmosférica:

- Se aplica el filtrado de lodo para excluir materiales altamente estructurados.
- Selecciona endmembers en base a un pequeño subconjunto de bandas disponibles para la mayoría de los sensores. Cuando un sensor abarca tanto las regiones espectrales visibles y NIR-SWIR, el algoritmo excluye bandas en la región visible.
- Restringe la curva de ganancia, para que sea constante en las longitudes de onda inferiores a $0.65 \mu m$.
- Suprime los efectos de la vegetación densa.

Una vez ejecutado el algoritmo, los valores de reflectividad que normalmente se expresan entre 0 y 1 tendrán como salida valores en el rango de 0 a 10000. Esto con la finalidad de agilizar el proceso del cálculo con valores enteros. Por lo cual es necesario un proceso de normalización de las imágenes (**Ecu. 4**).

$$\left[(b_{\lambda} \text{ le } 0) \times 0 + (b_{\lambda} \text{ ge } 10^4) \times 1 + (b_{\lambda} \text{ gt } 0 \text{ and } b_{\lambda} \text{ lt } 10^4) \times \left(\frac{\text{float}(b_{\lambda})}{10000} \right) \right] \dots (\text{Ecu. 4})$$

Donde:

b_{λ} representa a cada una de las bandas espectrales de la imagen, demás operadores lógicos (*le*, *ge*, *gt* y *lt*) son parte de la sintaxis del lenguaje de programación en IDL.

▪ **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**

FLAASH es una modelo de transferencia radiativa (empleado por el software ENVI v5.3) que corrige la radiación capturada por el sensor en longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo a partir de las bandas ubicadas en el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta.

Este modelo puede ser ejecutado con una gran lista de sensores multiespectrales e hiperespectrales. La simulación de las concentraciones de vapor de agua y la recuperación de aerosol solo son posibles cuando la imagen contiene bandas espectrales en las longitudes de onda adecuadas (**Matthew et al., 2000**). Además, es posible corregir imágenes capturadas en distintas geometrías de visión vertical.

A diferencia de otros modelos de corrección atmosférica que interpolan propiedades de transferencia de radiación a partir de una base de datos pre-calculados de los resultados del modelo, FLAASH introduce el código de la transferencia radiativa MODTRAN (**Berk et al., 1998; Berk, Bernstein, & Robertson, 1989**). En el que es posible seleccionar cualquiera de los modelos MODTRAN estándar para representar la escena; es entonces que una solución MODTRAN única se calcula para cada imagen.

▪ **Modelo 6s**

El modelo de transferencia radiativa 6S es el segundo proceso ejecutado por el software CLASlite. Fue desarrollado por Vermote y su equipo para simular la atmosfera terrestre en cada imagen satelital (**Vermote, Tanre, Deuzé, Herman, & Morcrette, 1997**).

6s busca tablas de referencia de data del sensor MODIS, que proporciona una cobertura global casi diaria. Luego, este atenúa el ruido espectral a partir del mejor modelo estimado de la atmósfera. El equipo de CLASlite ha automatizado la integración de concentración de vapor de agua y aerosoles. Es así que cuando el software procesa una imagen, usa las medidas promedio mensuales que corresponden a la fecha de la imagen. El resultado es la imagen corregida atmosféricamente en unidades de reflectividad superficial.

Además de la atmósfera, hay otras barreras o artefactos (nubes y sombras) que impiden el registro adecuado de energía radiante desde superficie. CLASlite atiende estas y las enmascara en varios pasos.

En algunos casos, el modelo de corrección atmosférica no funciona perfectamente. Esto se debe principalmente a que las áreas sombreadas o áreas obstruidas por un pesado

contenido de aerosoles, el valor de la reflectividad puede resultar negativo. En cambio, algunos pixeles pueden exceder al 100% de la energía incidente ($\rho_{\lambda ij} > 1$), como consecuencia de una falla en el modelo al remover la radiación reflejada de la atmósfera, en comparación con la superficie terrestre.

2.3.4. Corrección topográfica

Debido al ruido espectral introducido por el efecto de sombras, causado por la posición del sol y el sensor al momento de la toma de la escena, es que se hace necesaria una corrección topográfica, homogenizando espectralmente los pixeles que representan el mismo tipo de cobertura. Más aún en áreas con relieve accidentado como la cordillera de los Andes.

El primer paso para una corrección por sombras, es el cálculo del modelo iluminación, que se basa (**Ecu. 5**) (**Civco, 1989; Colby, 1991**).

$$\cos \gamma_{ij} = (\cos \theta_s \times \cos \eta_{ij}) + (\sin \theta_s \times \sin \eta_{ij} \times \cos(\Phi_a - \Phi_o)) \dots (\text{Ecu. 5})$$

Donde:

γ_{ij} , es el ángulo de incidencia, θ_s es el ángulo de elevación solar, η_{ij} es el ángulo de la pendiente, Φ_a es el acimut solar y Φ_o es el aspecto u orientación de la pendiente.

Los ángulos de elevación y azimut solar son extraídos de los metadatos de la imagen satelital para especificar las condiciones de registro. Para datos Landsat TM / ETM+/OLI, se podría asumir un único conjunto de ángulos ya que los escenarios son relativamente pequeños; sin embargo, teniendo dicha información en los metadatos es mejor utilizarlos. Ahora, respecto a escenas extensas (por ejemplo, productos MODIS o VGT), los ángulos deben adaptarse a las variaciones latitudinales y longitudinales. Para calcular la pendiente y el aspecto, se requiere de un modelo de elevación digital (MED) de resolución similar o superior a la de las imágenes utilizadas. Estos están basados en técnicas fotogramétricas como la estereoscopía y la ya conocida interferometría satelital a partir de datos de sensor radar. Entre ellas tenemos al ASTER-GDEM, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y el ALOS-1 PALSAR.

Calculado el modelo de iluminación, la eliminación de sombras puede estar basada en diferentes métodos. Los cuales se agrupan en los que asumen condiciones Lambertianas y los que consideran como direccional a la reflectividad. Para el primer enfoque, el método más extendido es la corrección del coseno (**Ecu. 6**) (**Teillet, Guindon, & Goodenough, 1982**).

$$\delta\rho_{\lambda ij} = \rho_{\lambda,i,j} \times \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \gamma_{ij}} \right) \dots (Ecu. 6)$$

Donde: Donde $\delta\rho_{\lambda ij}$ es la reflectividad normalizada de un $pixel_{ij}$, en la banda λ ; $\rho_{\lambda ij}$ es la reflectividad cruda de un $pixel_{ij}$, en la banda λ , $\cos \bar{\gamma}$ es el valor promedio del modelo de iluminación escalado (0 – 255) de iluminación y $\cos \gamma_{ij}$ es el valor de iluminación escalada (0 – 255) por $pixel_{ij}$.

Este algoritmo es fácilmente aplicable, ya que no requiere parámetros externos. Sin embargo, se ha demostrado que sobrecorrege áreas bajo condiciones de poca iluminación (**Meyer, Itten, Kellenberger, Sandmeier, & Sandmeier, 1993**).

Un algoritmo alternativo fue propuesto por **Civco (1989) (Ecu. 7)**, que toma en cuenta las condiciones de iluminación promedio.

$$\delta\rho_{\lambda ij} = \rho_{\lambda ij} + \left(\rho_{\lambda ij} \times \left(\frac{\cos \bar{\gamma} - \cos \gamma_{ij}}{\cos \bar{\gamma}} \right) \right) \dots (Ecu. 7)$$

Donde:

$\cos \bar{\gamma}$ es el valor promedio del modelo de iluminación del área de estudio y $\cos \gamma_{ij}$ es el valor por cada $pixel_{ij}$ del modelo de iluminación.

Para el segundo enfoque, tener que explicar la diferencia entre bandas en la irradiación difusa, diferentes autores han propuesto algoritmos incluyendo parámetros para cada banda (longitud de banda). El más extendido fue propuesto por **Teillet et al. (1982) (Ecu. 8-10)**, y fue nombrado el **C-corrección**.

$$\delta\rho_{\lambda ij} = \rho_{\lambda,i,j} \times \left(\frac{\cos \theta_s + C_\lambda}{\cos \gamma_i + C_\lambda} \right) \dots (Ecu. 8)$$

$$C_\lambda = \frac{b_\lambda}{m_\lambda} \dots (Ecu. 9)$$

$$\rho_{\lambda,i} = b_\lambda + (m_\lambda \times \cos \gamma_i) \dots (Ecu. 10)$$

Donde:

b_λ y m_λ son los coeficientes de la regresión entre el modelo de iluminación $\cos \gamma_{ij}$ y la reflectividad $\rho_{\lambda,i,j}$ en cada una de las bandas espectrales.

Por lo tanto, C_λ se calcula como una constante empírica para cada banda espectral.

Este método tiene en cuenta la irradiancia difusa por una estimación semiempírica del factor C_λ .

Los métodos Civco y Teillet por su parte tiene una base física, y solo los parámetros de corrección adicionales se estimaron por métodos empíricos.

2.4. Procesamiento digital de imágenes satelitales

2.4.1. Clasificación digital multivariable orientada a objetos

En la mayoría de los procesos de análisis digital de imágenes satelitales, la clasificación supone la fase culminante. Es por ello que la mayor parte de los filtros y correcciones realizados previamente tratan de orientarse a esta última etapa.

Toda metodología aplicada en la clasificación tiene que ser confiable, replicable, robusta, escalable y objetiva (**Cihlar, Latifovic, Huang, & Dixon 1998**), donde la participación del especialista sea parcial y que los resultados no estén marcados, en su totalidad, por sus decisiones. Por otra parte, la clasificación no pretende definir espectralmente cada cobertura, sino caracterizarla relativamente para un sensor, escena, área de estudio y fecha en concreto (**Robinson, Chavez, Gehring, & Holmgren, 1981**).

Hasta este punto se ha descrito sucintamente el proceso que conlleva ejecutar una clasificación. Sin embargo, a lo largo del desarrollo del procesamiento digital de las imágenes es posible evidenciar que el comportamiento espectral de una cobertura puede presentar similitudes con otras. En consecuencia, no es suficiente trabajar con las bandas multiespectrales, sino que además es necesario añadir variables complementarias para mejorar su discriminación; entre estas variables tenemos a: la transformación espectral TasseledCap traducido en los índices de brillo, verdor y humedad; el índice de vegetación diferencia normalizada (NDVI); los modelos de elevación y pendiente. Adoptando un enfoque de clasificación multivariable.

Por otro lado, tradicionalmente la clasificación recurre a la variación espacial-espectral de cada pixel, por lo que podemos mencionar al convencional enfoque basado en el análisis de píxeles individuales. Sin embargo, en ciertas ocasiones es imprescindible adoptar otros criterios, así como el contexto espacial. En este sentido, el método de extracción y clasificación de objetos homogéneos (ECHO), propuesto por **Kettig & Landgrebe (1976)**, se ha empleado con mayor frecuencia en los últimos años, ante la necesidad por plantear metodologías de clasificación con mayor robustez, sobre todo en áreas de coberturas heterogéneas. Entonces, este enfoque propone clasificar una imagen a partir de la agrupación píxeles vecinos con características espectrales similares (objetos o segmentos).

La segmentación de una imagen o extracción de objetos está basada en criterios de contigüidad y similitud global en todas las bandas multiespectrales. Entonces, tras la pequeña agrupación de píxeles espectralmente homogéneos, el algoritmo de

segmentación incorpora paulatinamente píxeles cercanos, siempre que su similitud espectral cumpla con los criterios de homogeneidad establecidos por el usuario, así como la distancia espectral en cada una de las bandas en un conjunto de píxeles adyacentes.

En conclusión, tanto en la clasificación con enfoque en el análisis de píxeles o segmentos, en ambos se da caracterización digital de las categorías (etapa de entrenamiento del modelo o training), la asignación de objetos o píxeles en la imagen a cada una de las categorías y por último las pruebas de confianza o confiabilidad de resultados (testing).

2.4.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ha sido el más empleado para el monitoreo de ecosistemas, condiciones favorables para la ocurrencia de incendios forestales, clasificación de coberturas, monitoreo de bosques y demás aplicaciones durante las dos últimas décadas. Este índice fue propuesto por **Rouse et al. (1974)** a partir del análisis de datos de ERTS-1 MSS (**Ecu. 11**).

$$NDVI_{i,j} = \frac{\rho_{NIR,i,j} - \rho_{RED,i,j}}{\rho_{NIR,i,j} + \rho_{RED,i,j}} \dots (Ecu. 11)$$

Donde:

$\rho_{NIR,i,j}$ y $\rho_{RED,i,j}$ representan a la reflectividad para cada $pixel_{ij}$ en longitudes de onda del infrarrojo cercano y rojo respectivamente.

La ecuación anterior es el resultado del particular comportamiento de la radiación solar en su interacción con la cobertura vegetal, ya que estas tienden a ser reflejadas y absorbidas con mayor intensidad en los rangos de longitudes de onda del infrarrojo cercano y rojo respectivamente. Llegando a la conclusión que a una mayor distancia espectral entre los valores de reflectividad exponen un estado de vigorosidad de la vegetación y caso contrario un estado de alerta debido a la caída de la actividad fotosintética como consecuencia de su comportamiento estacional o la intervención antrópica.

La principal ventaja del NDVI frente al tradicional cociente entre bandas espectrales es que este sume una variabilidad entre -1 y 1, lo cual facilita en gran medida su análisis e interpretación. Además, el NDVI ha sido utilizado para distintas variables relacionadas con la vegetación como el flujo neto de dióxido de carbono (CO_2), contenido de clorofila, humedad de cubierta vegetal, variabilidad fenológica, índice de área foliar (LAI), evapotranspiración y muchos más.

2.4.3 Transformación Tasseled Cap (TTC)

La Transformación Tasseled Cap (TTC) es producto de la combinación lineal de bandas espectrales, con el objetivo de resaltar rasgos particulares en la imagen. La principal diferencia de la TTC frente al Análisis de Componente Principales (PCA) reside en el significado físico que representa. Fue propuesta por **Kauth & Thomas (1976)** bajo el marco del proyecto “Large Area Crop Inventory Experiment - LACIE” desarrollado por la Agencia Aeroespacial de los Estados Unidos (NASA) y el Departamento de Agricultura Estadunidense (USDA) durante la década de los 70’s, con el objetivo de optimizar la productividad en la etapa de cosecha. En este proyecto se toma una serie de imágenes multiespectrales de áreas agrícolas, a partir de los cuales se intentó sintetizar la variación espectral en un gráfico tridimensional, obteniéndose una figura con aspecto similar a un sombrero con borlas (Tasseled Cap) (**Figura 5**).

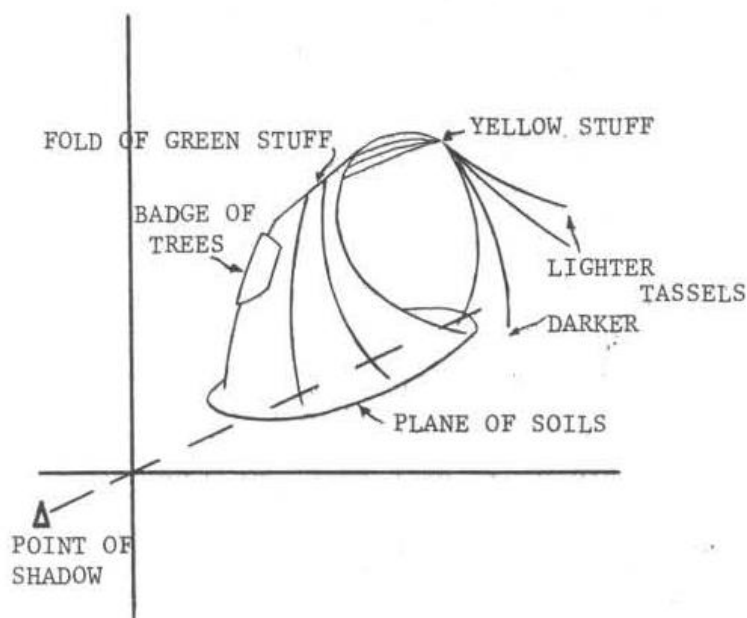


Figura 5| Comportamiento temporal del ciclo vegetativo de los cultivos en las bandas NIR y el rojo.
Fuente: Kauth & Thomas (1976).

En este gráfico, la base del sombrero, representada por las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y rojo, define el tipo de suelo por su color y brillo. Además, según la vegetación vaya ganando mayor vigorosidad comienza a alejarse de la base del sombrero y tiende a aproximarse al eje del NIR, convergiendo en un punto al alcanzarse la madurez máxima. Sin embargo, cuando la vegetación pierde vigorosidad, después de haber alcanzado un clímax, retorna a la base del sombrero, traduciéndose como la marchitez del cultivo.

De lo descrito anteriormente, en **Kauth & Thomas (1976)** distinguen al brillo espectral (*brightness*) que es la suma ponderada de las cuatro primeras bandas, al verdor espectral (*greenness*) asociado a la actividad fotosintética y la marchitez (*yellowness*) asociado al decaimiento de vigorosidad en la vegetación.

En un primer momento, la TTC no fue de gran impacto científico, en comparación a otras transformaciones e índices espectrales. Sin embargo, desde mediados de los 80's hasta la actualidad, la TTC fue adaptado a otros sensores como el TM, ETM y OLI de la colección Landsat (Baig, Zhang, Shuai, & Tong, 2014; Crist, 1985). En investigaciones de análisis comparativo se ha expuesto la presencia de un nuevo componente de la TTC llamado humedad espectral (*Wetness*), relacionado con la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) que proporcionan los sensores TM, ETM y OLI a diferencia del sensor MSS trabajado por **Kauth & Thomas (1976)**. Es así que la TTC de una imagen con bandas espectrales en el visible, NIR y SWIR presentan tres ejes principales de variación:

Brillo (Brightness), suma ponderada de cada una de las bandas espectrales, incluida la banda térmica. La variación en este eje muestra los cambios en la reflectividad total de la escena.

Verdor (Greenness), indica el contraste entre las bandas ubicada en el espectro visible y el NIR. Además, destaca la intervención de la banda del SWIR, la ponderación negativa de las visibles y la anulación mutua de las dos en el infrarrojo medio.

Humedad (wetness), relacionado con el SWIR, debido a su comportamiento peculiar a partir del cual se identifica con claridad la absorción del agua por parte de la vegetación y el suelo.

2.5. Proyecto CORINE Land Cover

En 1985, la “Unión Europea - UE” da inicio al proyecto CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC) con el objetivo de implementar una base de datos cartográfica acerca de la cobertura y uso de tierra a partir del procesamiento de imágenes satelitales registradas por la colección Spot y Landsat principalmente. Desde 1995, el proyecto es dirigido por la “Agencia Europea de Medio Ambiente - AEMA” (**European Environment Agency, 1994**). Este proyecto vincula diferentes niveles de detalle temático y espacial basado en una leyenda jerárquica.

Asimismo, esta metodología fue adaptada por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) en el marco del proyecto “Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura

de la Tierra en la Comunidad Andina” (MINAM, 2014) impulsado por la Comunidad Andina de Naciones (CAN) en la elaboración de una leyenda Subregional de coberturas terrestres (**Tabla 2**), siendo la adaptación colombiana del “Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM” el principal marco de comparabilidad internacional en la región. Actualmente, esta leyenda es de utilidad en el marco de la “Zonificación Ecológica Económica – ZEE” a través de los “Estudios Especializados de Dinámicas de Cambio de Cobertura y Uso de Tierra”.

Tabla 2| Leyenda jerárquica de cobertura de tierra – MINAM.

Fuente: MINAM (2014).

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV
1. Áreas Artificializadas	1.1. Áreas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	
		1.1.2 Tejido urbano discontinuo	
	1.2. Áreas industriales e infraestructura	1.2.1 Áreas Industriales o comerciales	
		1.2.2 Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	
		1.2.3 Áreas portuarias	
		1.2.4. Aeropuertos	
		1.2.5 Obras hidráulicas	
	1.3. Áreas de extracción de minería e hidrocarburos y escombreras	1.3.1. Áreas de extracción de minería e hidrocarburos	
		1.3.2 Áreas de disposición de residuos	
	1.4. Áreas verdes artificiales no agrícolas	1.4.1 Áreas verdes urbanas	
		1.4.2 Instalaciones recreativas	
2. Áreas Agrícolas	2.1. Cultivos transitorios		
	2.2. Cultivos permanentes		
	2.3. Pastos		
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas		
3. Bosques y áreas mayormente naturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso bajo	
		3.1.2. Bosque abierto bajo	
		3.1.3. Bosque denso alto	
		3.1.4. Bosque abierto alto	
		3.1.5. Bosque fragmentado	

	3.2. Bosques plantados		
	3.3. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.1. Herbazal	3.3.1.1. Herbazal denso
			3.3.1.2. Herbazal abierto
		3.3.2. Arbustal	3.3.2.1. Arbustal denso
			3.3.2.2. Arbustal abierto
		3.3.3. Vegetación secundaria o transición	
		3.3.4. Vegetación arbustiva / herbácea	3.3.4.1. Vegetación arbustiva / herbácea densa
			3.3.4.2. Vegetación arbustiva / herbácea abierta
		3.3.5. Arbustal / área intervenida	
		3.3.6. Herbazal / área intervenida	
		3.3.7. Arbustal - Herbazal / área intervenida	
	3.4. Áreas sin o con poca vegetación	3.4.1. Áreas arenosas naturales	
		3.4.2. Afloramientos rocosos	
		3.4.3. Tierras desnudas	
		3.4.4. Áreas quemadas	
		3.4.5. Glaciares	
		3.4.6. Solares	
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Áreas pantanosas	
		4.1.2. Tuberías y bofedales	
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos	
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes	
		5.1.3. Lagunas, lagos y ciénagas naturales estacionales	
		5.1.4. Canales	
		5.1.5. Cuerpos de agua artificiales	
	5.2. Aguas costeras	5.2.1. Lagunas costeras	
		5.2.2. Mares y océanos	

2.6. Modelo de clasificación Random Forest

Random forest (RF), propuesto por (L. Breiman, 2001), es un modelo de regresión y clasificación que consiste de una colección de clasificadores estructurados por árbol (decision tree), donde cada uno trabaja en función a los valores de un vector (Ecu. 12A-11B). Asimismo, estos vectores de entrada para cada árbol gozan de la misma distribución de datos de las variables predictoras. En resumen, este modelo está dado por la predicción promedio del embolsamiento o “bagging” de una gran cantidad de árboles de decisión no correlacionados.

$$k = \{1, \dots, n\} \dots (Ecu. 12A)$$

$$h(x, \theta_k) \dots (Ecu. 12B)$$

Donde:

“ θ_k ” son vectores aleatorios independientes, distribuidos de forma idéntica para cada árbol de decisión “k”, arrojando un voto unitario para la categoría más popular en la entrada “x” (L. Breiman, 2001).

Cada árbol de decisión en un RF se construye usando una muestra de arranque de los datos (Yeh, Huang, & Wang, 2014). El “aprendizaje” del árbol crece en el proceso de capacitación de datos usando la metodología llamada **CART** (Classification and Regression Tree). El principio operativo de RF se resume paso a paso, y se ilustra en la **Figura 6**.

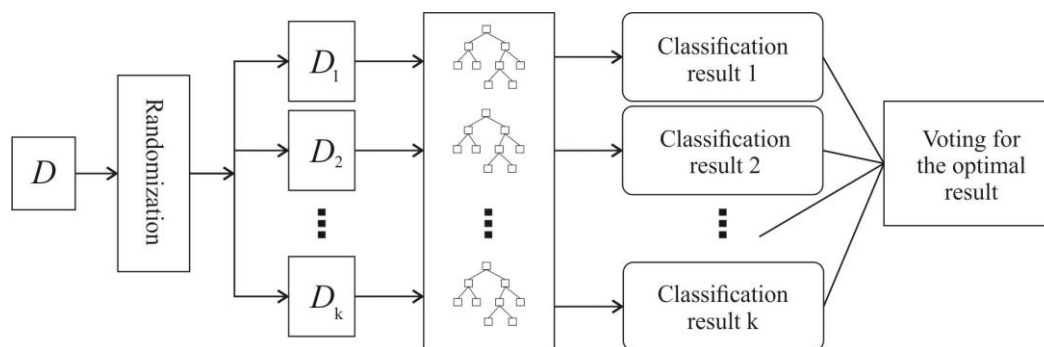


Figura 6| Principio de clasificación en Random Forest.

Fuente: Wang & Rudin (2015).

Paso 1: “k” subconjuntos de la muestra de entrenamiento $\{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ se extraen del conjunto de entrenamiento D utilizando el *bootstrap sampling method*. El tamaño de muestra de los subconjuntos D_k es el mismo que el conjunto de entrenamiento D .

Paso 2: Se construyeron “k” árboles de decisión de acuerdo con los “k” subconjuntos y “k” resultados de clasificación obtenidos.

Paso 3: Cada árbol de decisión emite un voto unitario para la clase más popular, luego se determinan los resultados óptimos.

2.7. Páramo o Jalca

El páramo es un ecosistema natural dominado por pajonales, arbustales, humedales y pequeños bosquetes (Vásconez & Hofstede, 2006); además, posee gran diversidad endémica en flora. Posee un clima que se rige por lluvias estacionales y bajas temperaturas. Su geomorfología consiste principalmente de valles accidentados de origen glacial (Buytaert et al., 2006); asimismo, estos se constituyen como áreas de captación y filtración de precipitación líquida que posteriormente drenará hacia altitudes inferiores como flujos subsuperficiales, cumpliendo así la función de regulador de la disponibilidad hídrica en los Andes (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Definir los límites de ubicación de los ecosistemas páramo, en la actualidad, es tema controversial debido a que estos han ido variando históricamente por su fragilidad frente a la dinámica de los cambios entre coberturas naturales e intervenidas, lo que contribuyó a una zona de transición confusa y heterogénea que pueda definirlos espacialmente (Llambí, 2012). Sin embargo, generalmente su ubicación altitudinal refiere al límite superior e inferior de los bosques montanos (~3500 msnm) y las nieves perennes (~5000 msnm) respectivamente (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Según Llambí (2012), los páramos se clasifican en tres pisos ecológicos (sub-páramos, páramos y superpáramos) partir de los cambios en la climatología a lo largo de la gradiente de elevación (Figura 7).

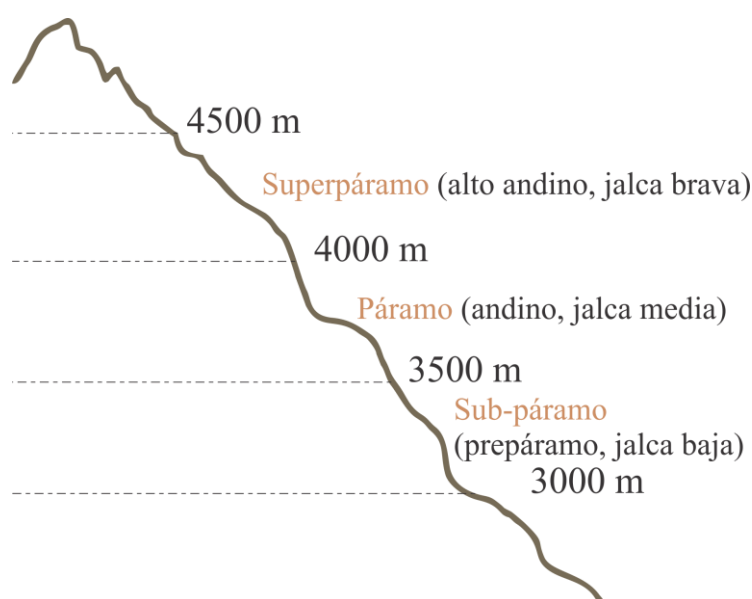


Figura 7 | Clasificación del páramo a largo del gradiente altitudinal.
Fuente: Llambí (2012).

Entre los 3000 y 3500 msnm se encuentra la zona de transición entre los páramos abiertos y los bosques de montaña. Estas áreas son llamadas sub-páramos, pre-páramos o jalca baja (**Llambí, 2012**). Sus límites altitudinales pueden variar debido al comportamiento local de la precipitación, que es el que caracteriza principalmente a este ecosistema. Entre los 3500 y 4000 msnm se encuentran páramos o jalca media. En este piso altitudinal, los pajonales, arbustales y frailejones son la flora más característica de este ecosistema (**Llambí, 2012**). Por último, por sobre los 4000 msnm hasta el límite de las nieves perennes se encuentra el superpáramo con menor diversidad vegetativa y suelos menos desarrollados que en los páramos y sub-páramos. Esto debido a las condiciones climáticas extremas a las cuales se enfrenta (**Llambí, 2012**).

Entonces la pregunta surge, ¿cómo diferenciar entre páramos y jalca? ¿existen límites definidos entre ellos? En el segundo conversatorio sobre ecosistemas páramos, llevado a cabo el 20 de agosto del 2008 en Piura, mencionan que “el bioma páramo cubre la región andina superior del oeste de Venezuela, Colombia, Ecuador hasta la depresión de Huancabamba (Piura) (**Figura 8**) al norte del Perú, donde la transición a la puna origina las formaciones de jalca” (**Torres & López, 2008**).

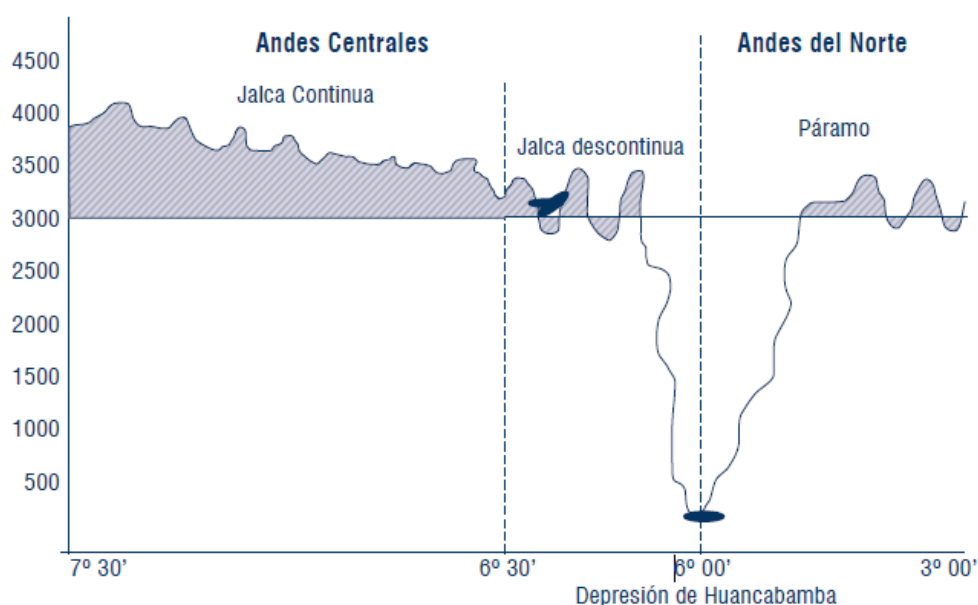


Figura 8 | Corte Longitudinal de los Andes hacia ambos lados de la depresión de Huancabamba.
Fuente: Torres & López (2008).

En **Ochoa-Tocachi et al. (2016)**, el páramo, la jalca y la puna son tierras de alta montaña que se extienden por encima de la línea forestal (3000 a 3500 msnm) y la línea de nieve permanente (4500 a 5000 msnm) (**Buytaert et al., 2006; Céleri et al., 2009; Sánchez-Vega & Dillon, 2006**).

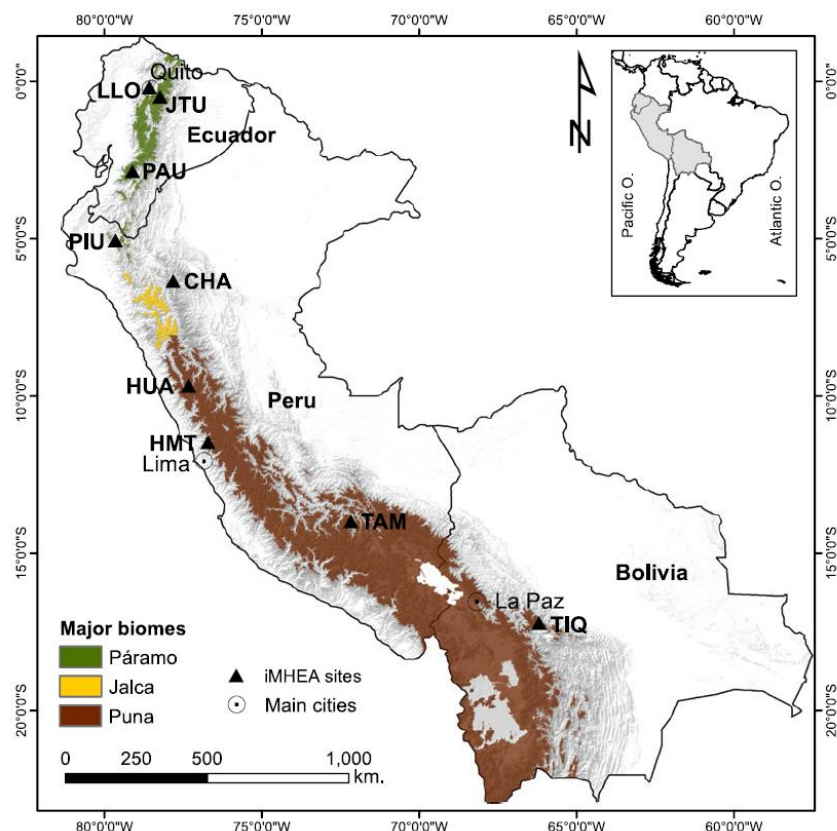


Figura 9| Ubicación de los biomas de alta montaña a lo largo de la cordillera de los Andes.
Fuente: Ochoa-Tocachi et al. (2016).

2.8. Contexto político-económico en los 80's y 90's

Económicamente, el Perú, a lo largo de su historia, ha atravesado por numerosas etapas de crecimiento, impulsadas principalmente por exportaciones mineras (**Cárdenas, Ocampo, & Thorp, 2000; Thorp & Bertram, 1978**). Por ejemplo, posterior a la independencia, el país estuvo sumergido en un período de inestabilidad económica; sin embargo, esta se reestableció a finales del siglo XIX como consecuencia de la alta demanda de metales, contribuyendo a una alta producción de oro, cobre y plata. Por otro lado, ya en la segunda mitad de los 60's, como consecuencia de la estatización y expropiación de concesiones mineras por parte de gobiernos militares, las inversiones extranjeras a través de operaciones mineras se detuvieron masivamente (**Becker, 1983; Dore, 1988**).

Esta situación no mejoró sino hasta después del desastroso período presidencial de Alan García Pérez, con tasas de inflación de hasta el 7500% y el PBI (Producto Bruto Interno) disminuido en más del 30% (**Skidmore & Smith, 2001**). Ya en los 90's, en el Perú, las reformas económicas y políticas neoliberales implantadas por el gobierno de Alberto Fujimori, incluyeron una reconfiguración de la economía a través de la adopción de una

constitución en 1992, con mecanismos más eficientes de oferta, demanda y precios y un sistema de auto-regulación.

En 1991, el gobierno peruano abrió todos los sectores económicos a la inversión extranjera directa, eliminando toda restricción a dividendos, regalías y remesas, además del acceso al crédito interno y adquisición de suministros y tecnologías extranjeras. Asimismo, el gobierno ofreció paquetes de estabilidad tributaria para inversionistas extranjeros por un período de diez a quince años e implementó programas de privatización de gran alcance que ofrecían oportunidades de inversión a capitales internacionales y eliminó la competencia con empresas estatales y nacionales (**Bury, 2005**). Sin embargo, en 1992, la nueva agenda neoliberal generó una creciente oposición política, obligando al presidente Alberto Fujimori a cerrar el gobierno en un "auto-golpe" de estado, reformulando la constitución del país. Esta nueva constitución estableció el escenario para la revaluación de los derechos en la tenencia de tierras con la finalidad de facilitar la propiedad privada. De esta manera, el gobierno destacaba la importancia de la inversión extranjera para el crecimiento económico continuo del país.

Años después, en 1996, las concesiones mineras fueron objeto de recurrentes reclamos bajo una variedad de decretos gubernamentales históricos contradictorios, lo que dio lugar a concesiones con más de un propietario y disputas legales por los recursos dentro de ellos. Sin embargo, en ese mismo año la promulgación de la "Ley Nacional de Catastro Minero – Ley 26615" revisó los derechos de tenencia de la tierra a nivel nacional. Esta ley eliminó muchos procedimientos anteriores de reclamos y concesiones, unificándolos bajo un nuevo sistema de referencia geográfico. Esta acción garantizó, hasta la actualidad, el control exclusivo de los recursos a las empresas mineras nacionales y transnacionales y así poder implementar sus operaciones con el respaldo de las leyes del estado (**MINEM, 2000**).

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Área de estudio

El área de estudio es la cuenca del río Mashcón, localizada al sur del departamento Cajamarca, en los Andes del norte del Perú y región occidental de la cabecera de cuenca del Amazonas (6.98° S–7.22° S y 78.63° W–78.45° W) (**Figura 10**). Cubre una extensión de ~311 km² entre los 2650 y 4200 msnm. Políticamente abarca la jurisdicción de los distritos de Cajamarca y Baños de Inca, ambos en la provincia de Cajamarca.

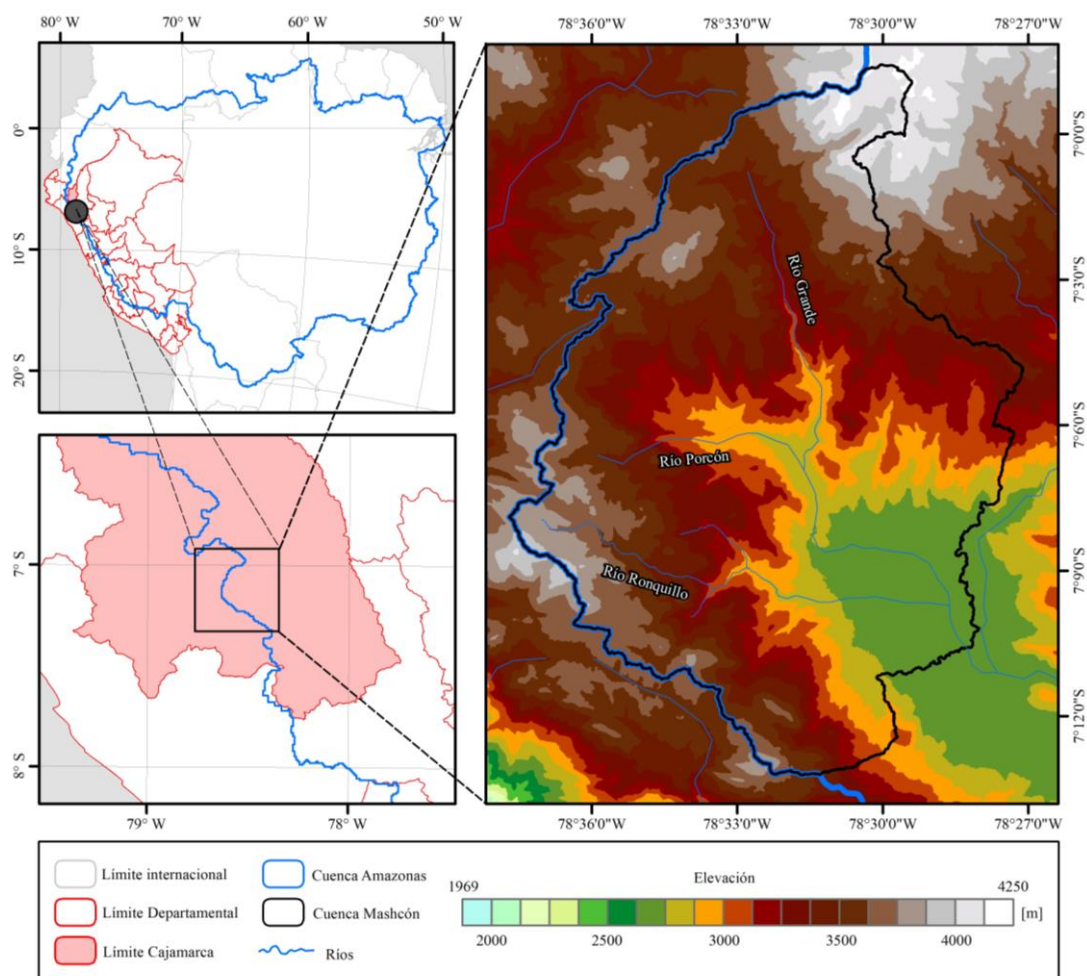


Figura 10 Mapa de ubicación de la cuenca del río Mashcón.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Edafología

Como parte del proyecto de Zonificación Ecológica Económica (ZEE) realizado por el Gobierno Regional de Cajamarca (**GRC, 2011**), el estudio edafológico subdividió la cuenca del río Mashcón (~311km²) en los siguientes seis tipos de suelo: *Páramo-Andosol* (35.4%), *Andosol-Leptosol* (23.8%), *Phaeozem-Leptosol* (13.1%), *Paramosol* (9.7%), *Vertisol* (4.7%) y otros (13.3%); donde todo valor porcentual hace referencia al

área total de la cuenca (**Figura 11**) y que el nombre por tipo de suelo corresponde a la nomenclatura de la World Reference Base for Soil Classification (**FAO, 2006**).

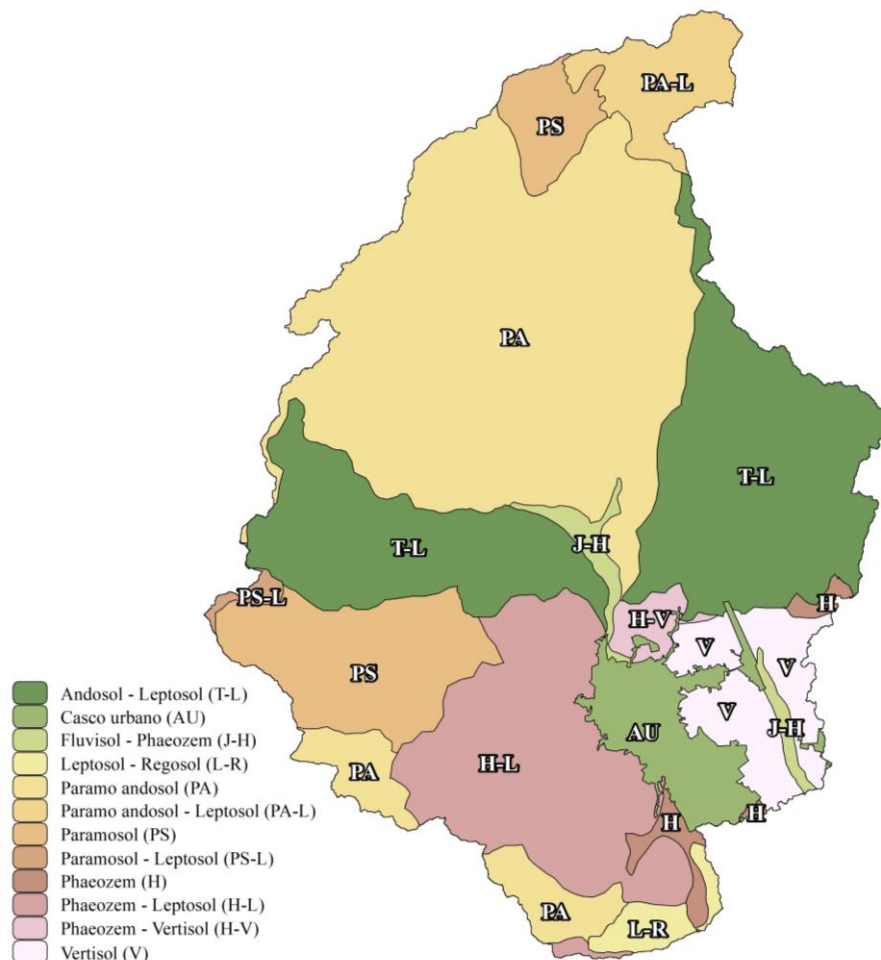


Figura 11| Distribución de tipos de suelo en la cuenca del río Mashcón.

Fuente: GRC (2011).

3.3. Climatología

El área de estudio posee un clima seco y templado, con eficiencia térmica cálida en invierno y baja concentración en verano. Las precipitaciones pluviales son estacionales y contrastadas, definiendo a los meses de diciembre a mayo como la época húmeda y a los meses de junio a noviembre como la época seca o de estiaje.

A continuación, el clima será expresado a través de parámetros como la precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación y radiación solar a lo largo de la gradiente de elevación.

La precipitación acumulada anual varía entre los 711mm al sur y 1170mm al norte de la cuenca, mientras que los rangos de temperatura anual promedio van desde los 7.3°C en áreas altas y 14.9°C en áreas bajas. Esta información fue extraída de los datos climáticos

de distribución grillada “WorldClim 2” de 1km de resolución espacial, generados para el período 1970-2000 (Fick & Hijmans, 2017).

En las zonas altas de la cuenca, la humedad relativa varía entre un máximo del 85.8% (marzo), hasta un mínimo del 63% (julio). En las partes bajas, este parámetro oscila entre los 74.6% (marzo), mientras el menor valor ocurre en el mes de julio con el 62.7% (ANA, 2010).

De acuerdo a los datos de evaporación registrados en la estación meteorológica “Weberbauer” del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi), esta detecta la mayor evapotranspiración del año en el mes de noviembre con 137 mm, iniciando su acenso en julio. Los valores más bajos registrados corresponden al mes de junio con 93 mm, donde el descenso paulatino de esta variable se inicia en diciembre.

Por último, el área de estudio solo cuenta con datos de radiación solar registrados en elevaciones bajas (valle de la cuenca), donde en el mes de mayo se reportan valores inferiores a los $16.4 \text{ MJ}/\text{m}^2 \times \text{día}$, mientras que en noviembre se registran valores máximos que alcanzan los $19.0 \text{ MJ}/\text{m}^2 \times \text{día}$ (ANA, 2010).

3.4. Actividad y producción agrícola.

La cuenca del río Mashcón comprende pastos y áreas agrícolas heterogéneas con cultivos cuyo período vegetativo es de aproximadamente dos años. Estos últimos son unidades que combinan dos o más tipos de coberturas agrícolas y/o naturales. Por su heterogeneidad resulta complicada su separación en coberturas individuales y posteriormente su análisis a partir de imágenes satelitales de resolución espacial media.

Estas coberturas están constituidas por diferentes cultivos, entre ellos los tubérculos y cereales (maíz, trigo y cebada) dispuestas en áreas reducidas (GRC, 2014) que en la mayoría de los casos están rodeados por pastos naturales, arbustales, bosques y se localizan en suelos con fuerte pendiente. Por otro lado, la escasez de tierras de cultivo a nivel regional y la falta de irrigación tecnificada son los factores principales por los cuales es necesario importar alimentos de regiones vecinas (GRC, 2014).

La producción agrícola (GRC, 2017) (Figura 12) en el distrito de Cajamarca la encabezan productos como (1) rye grass (45,550 TM, año 2012), pastos densos dedicados al pastoreo permanente por un periodo de dos o más años, su presencia se debe a la acción antrópica en zonas que se distribuyen en áreas planas (valle), laderas medias y altas; este cultivo está vinculada a la ganadería, la que se constituye como actividad económica importante

para el distrito, (2) alfalfa (3,630 TM, año 2012), vegetación herbácea utilizado como forraje para la alimentación de ganado vacuno principalmente (3) papa (3,118 TM, año 2012), tubérculo de gran consumo en la región debido a que garantiza la seguridad alimentaria de familia campesinas, su cultivo se distribuye en laderas medias y altas, (4) avena forrajera (2,558 TM, año 2012), cultivo introducido en la región principalmente con fines de alimentación ganadera y otros.

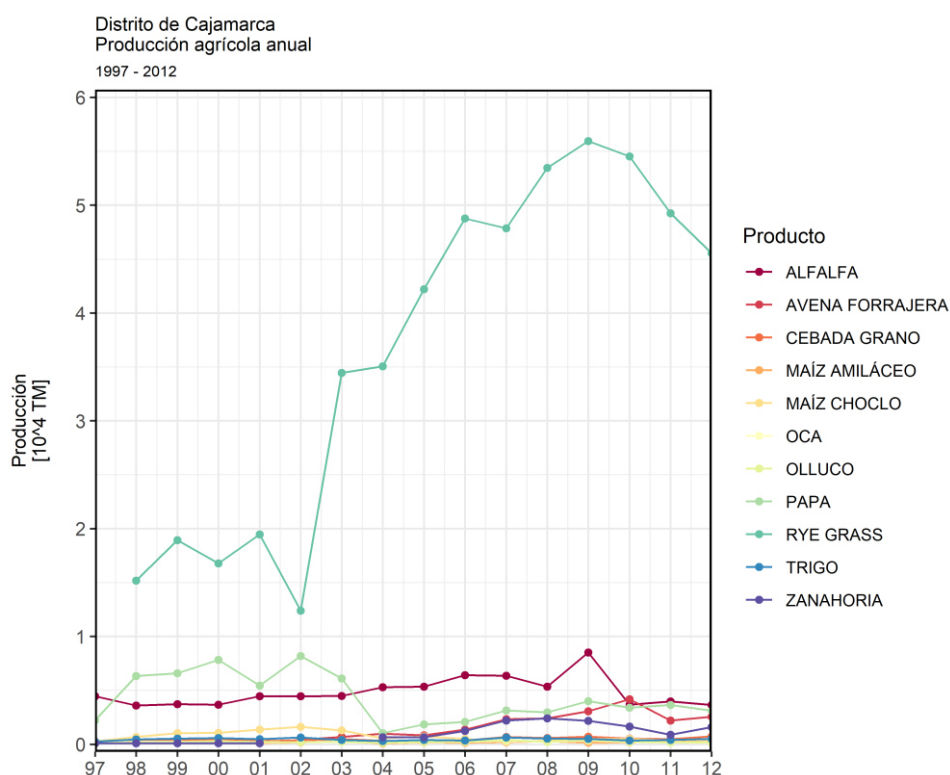


Figura 12 Producción Agrícola anual del distrito de Cajamarca (1997-2012) (GRC, 2017).

Fuente: Elaboración propia.

En base a la producción agrícola mostrada en la **Figura 12**, es evidente exponer la vocación agropecuaria de la cuenca del río Mashcón, “cultivar para alimentar al ganado”. Es así que la ganadería a nivel regional (GRC, 2017) está encabezada principalmente por ganado vacuno, ovino, porcino y caprino, además de la crianza de aves de corral y cuyes. De los productos derivados a partir de la actividad ganadera resaltan la producción láctea y carnes (GRC, 2017), siendo la producción Cajamarquina la de mayor demanda, a nivel nacional, por su variedad y la calidad.

La producción de carne en la región Cajamarca (**Figura 13**) es la más importante del país en cuestión de ganada vacuno; sin embargo, también se da la producción a partir de ganado ovino, porcino y caprino.

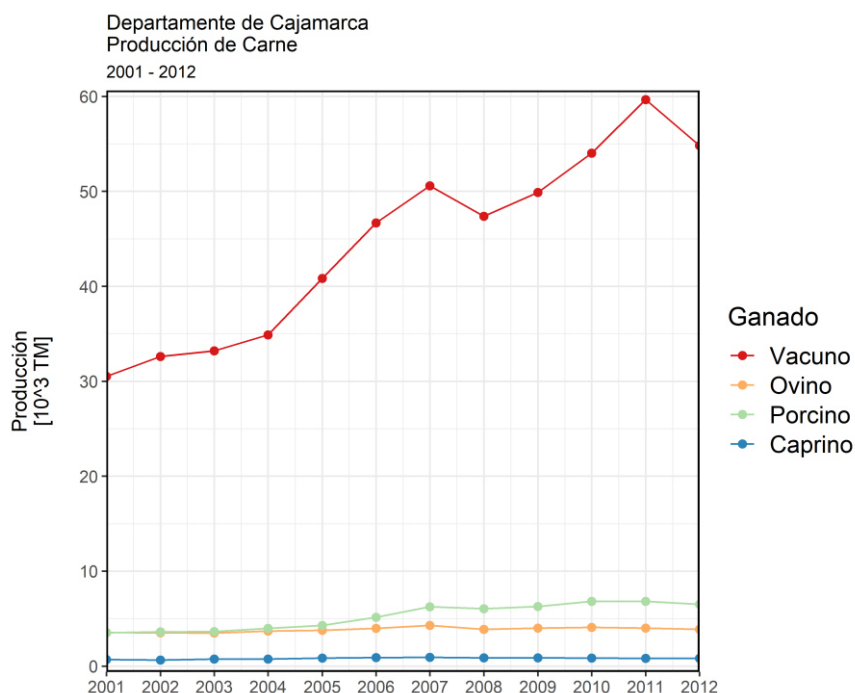


Figura 13] Producción anual de Carne de la región Cajamarca (2001-2012) (GRC, 2017).

Fuente: Elaboración propia.

En Cajamarca, la producción láctea es una de las actividades con mayor crecimiento en las últimas décadas. Es considerada como región con el mayor número de cabezas de ganado vacuno (~160mil unidades, 2017) y la tercera con la mayor producción de leche fresca a nivel nacional (GRC, 2017). Esta actividad se dinamizó debido a la presencia de las compañías Nestlé y Gloria, que se instalaron en los años 1947 y 1998 respectivamente.

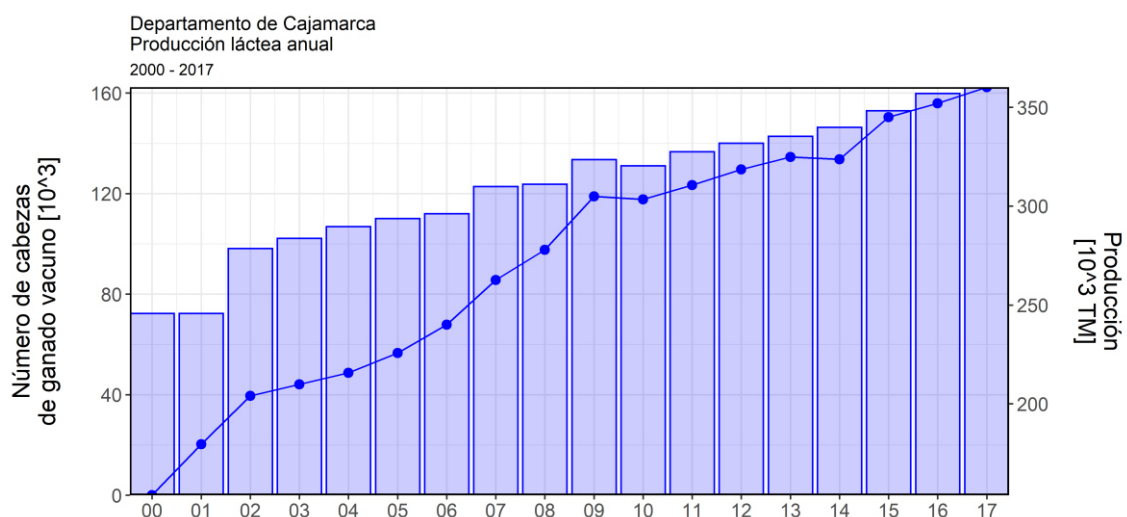


Figura 14] Número de cabezas de ganado vacuno (barras) y producción láctea anual (línea azul) de la región Cajamarca (2000-2017) (GRC, 2017).

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Actividad y producción minera

La cuenca del río Mashcón se destaca por su actividad y producción minera. En ella se extraen minerales metálicos y no metálicos como el oro y hormigón respectivamente; ambos, con una antigüedad de 25 y 30 años aproximadamente.

- Minería metálica

En los 80's, el organismo estatal francés “**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES - BRGM**”, a través del geólogo Pierre Maruéjol, descubrió al norte de la cuenca Mashcón, lo que hoy en día es el yacimiento de oro con mayor producción en todo Latinoamérica.

En 1992, **Newmont Mining Corporation**, la compañía de oro más grande del mundo, comenzó las operaciones para la extracción de oro en cooperación con la “**Compañía de Minas Buenaventura**” y la “**Corporación Financiera Internacional**”, juntos conocidos como “**Minera Yanacocha - MYSA**”. Desde 1976 hasta inicios de los 90's, el sector minero se vio afectado considerable, siendo el proyecto Yanacocha el inicio de grandes inversiones extranjeras (**Bury, 2005**).

La producción histórica de oro de MYSA en la región de Cajamarca se estiman en ~111 millones de onzas hasta el 2017 (**Figura 15**) (**MINEM, 2018**), y se ha convertido en uno de los principales productores de oro de América Latina con una producción anual de 81.5 mil onzas en 1993 a un máximo de 3.3 millones de onzas en el 2005 (**Figura 15**).

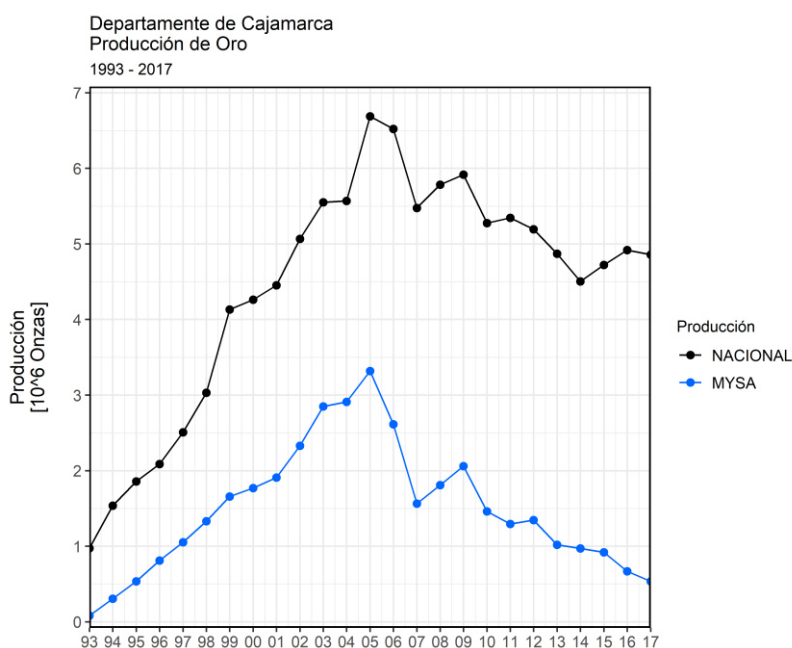


Figura 15] Producción anual de oro de la compañía MYSA (azul) y a nivel nacional (negro) en unidad de onzas (1993-2017) (MINEM, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

- Minería no metálica

Desde los 80's, se evidencian, al sur de la ciudad de Cajamarca, áreas de extracción de minerales no metálicos utilizados como agregados en el rubro de la construcción. Tenemos a las canteras “El Guitarrero” y “El Gavilán” que son unidades litológicas sedimentarias homogéneas que presentan areniscas cuarzosas en la parte inferior y cuarcitas blancas en bancos gruesos en la parte superior. Su color varía de blanco amarillento a blanco rojizo con bastante oxidación de fierro. Es explotada a tajo abierto y se encuentra al margen de la carretera Pacasmayo-Cajamarca. Tuvo una producción anual máxima y mínima de 50.9 TM y 8.4 TM en el 2009 y 2016 respectivamente (**Figura 16**) (**MINEM, 2018**).

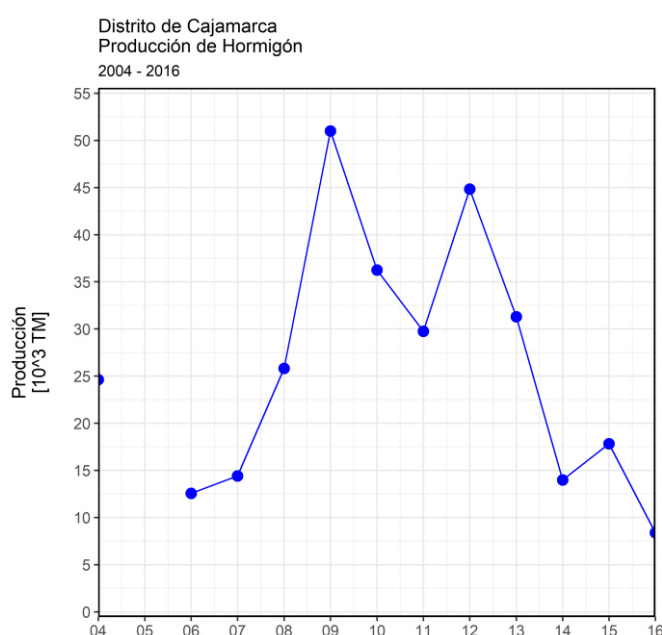


Figura 16] Producción anual hormigón del distrito de Cajamarca (2004-2016) (MINEM, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Demografía

La ciudad de Cajamarca, ubicada en el valle de la cuenca del río Mashcón, es una de las ciudades altoandinas más importantes del Perú. Esto debido al creciente desarrollo agroindustrial y potencial minero de la cuenca. La población Cajamarquina ha sido testigo de una gran dinámica demográfica (**Figura 17**). Hasta fines de los 70's, como resultado de la reforma agraria y como consecuencia la falta de capacidad técnica para el aprovechamiento intensivo de las tierras, gran número de campesinos se vieron en la necesidad de migrar a otras regiones. Sin embargo, ya en los 90's, con la promulgación de la nueva constitución del 1993 y el boom minero de los 90's, la ciudad de Cajamarca vio aumentada su población como resultado de la alta demanda de puestos de trabajo

dentro de la unidad minera. Asimismo, la actividad minera dinamizó otros sectores como el agrícola, ganadero y turístico.

La población actual de la ciudad de Cajamarca es de 201,329 habitantes según el último censo de población y vivienda del 2017 (INEI, 2018). En la **Figura 17** se muestra el crecimiento poblacional de departamento, provincia y distrito de Cajamarca (INEI, 2018). Del cual se destaca el aumento en la tasa de crecimiento poblacional entre los censos de 1981-1993 y 1993-2007 tanto a escala provincial como distrital, como consecuencia del boom minero de los 90's (Bury, 2005). Por último, entre los censos 1993-2007 y 2007-2017 se evidencia una baja en las tasas de crecimiento como resultado del decaimiento en la producción minera y falta de dinamismo en dicho sector (Castillo & Brereton, 2018).

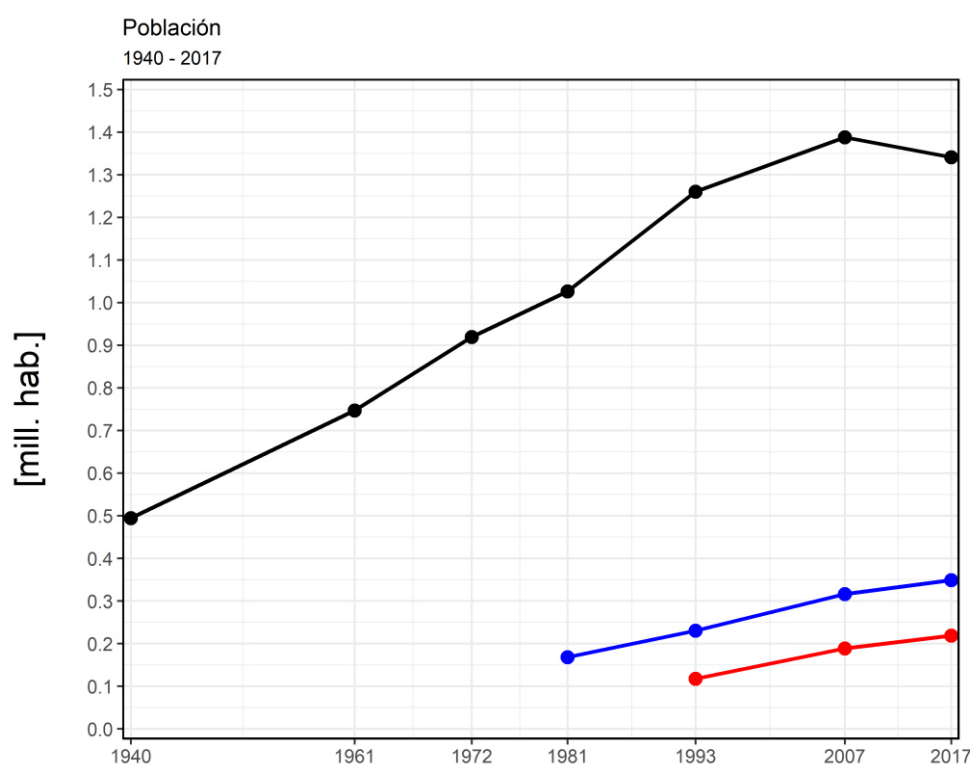


Figura 17] Población del departamento de Cajamarca (línea negra), provincia de Cajamarca (línea azul) y el distrito de Cajamarca (línea roja) (1940-2017) (INEI, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Materiales

El conjunto de datos empleados en esta investigación está basado principalmente en productos satelitales (óptico y radar). Sin embargo, fue necesaria la caracterización de los tipos de coberturas y usos de tierra (CUT) (**Tabla 3**) recopilados a partir de campañas de campo. Por último, esta caracterización muestra la vocación del área de estudio a las actividades extractivo – productivas.

Tabla 3] Descripción de los tipos de cobertura y uso de tierra en la cuenca del río Mashcón.

Fuente: MINAM (2014).

Cobertura y Uso de Tierra	Descripción
Agricultura	Unidades de tierra con dos o más tipos de cobertura agrícola (por ejemplo: papas, maíz, etc.).
Minería	Áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras.
Matorrales	Es una planta perenne con una estructura de tallo leñosa y una altura entre 0.5 y 2 m, fuertemente ramificada en la base y sin una copa definida.
Plantación forestal	Cubiertas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea con intervención antrópica.
Bosque montano	Vegetación arbórea con altura mayor a 5m.
Herbazal	Cobertura vegetal dominada por elementos herbáceos desarrollados en forma natural.
Jalca	Cobertura vegetal natural asociado a ecosistemas montañosos que regulan el ciclo hidrológico.
Cuerpos de agua	Superficie de cuerpos de agua naturales
Pastos	Tierras cubiertas por vegetación densa, dedicada al pastoreo permanente.
Áreas urbanas	Sistema urbano que incluye espacios con infraestructura urbana, áreas verdes y redes de comunicación asociados a ellos.

4.1.1. Imágenes multiespectrales

Las imágenes multiespectrales utilizadas (**Tabla 4**) corresponden a los sensores ópticos TM y OLI de la misión Landsat. Estos son productos L1T que cuentan con una corrección de terreno estándar y en gran medida son la base para el monitoreo de la dinámica de

coberturas terrestres. Son de acceso abierto y fueron descargadas de la plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del “Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS”.

Tabla 4| Lista de las escenas Landsat usadas en la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Radiométrica
10 / 08 / 1987	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
04 / 07 / 1991	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
17 / 07 / 1996	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
28 / 07 / 2000	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
01 / 08 / 2007	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
16 / 07 / 2013	Operational Land Imager (OLI)	30 metros	7 bandas (Coastal Blue, Visible, NIR, SWIR)	16 bits
24 / 07 / 2016	Operational Land Imager (OLI)	30 metros	7 bandas (Coastal Blue, Visible, NIR, SWIR)	16 bits

4.1.2. Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital (MED) usado es proveniente del sensor radar ALOS-1 PALSAR de la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) (**ASF DAAC, 2015**). Están disponibles en productos anuales desde el año 2006 hasta el 2011. Su producto cuenta con una resolución espacial de 12.5 metros de pixel y son de acceso libre a través de la plataforma Alaska Satellite Facility (<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>).

4.1.3. Campaña de recolección de información por tipo de cobertura y uso de tierra

En el marco de las actividades de la presente investigación, se realizaron campañas de campo para la recolección de información de los diversos tipos de coberturas y usos de tierras en la cuenca del río Mashcón y su subcuenca Ronquillo.

La caracterización de las coberturas fueron los días 10 y 11 de septiembre del 2016. Se formaron tres brigadas, las cuales capturaron un total de 296 puntos distribuidos a lo largo de la subcuenca Ronquillo, granja Porcón y parte de unidad minera Yanacocha (**Figura 18a**). Aplicando para ello el método de muestreo sistemático no alineado (**Dozier & Strahler, 1983; Rosenfeld, 1982; Stehman, 1992**) y dándole posicionamiento con receptores navegadores.

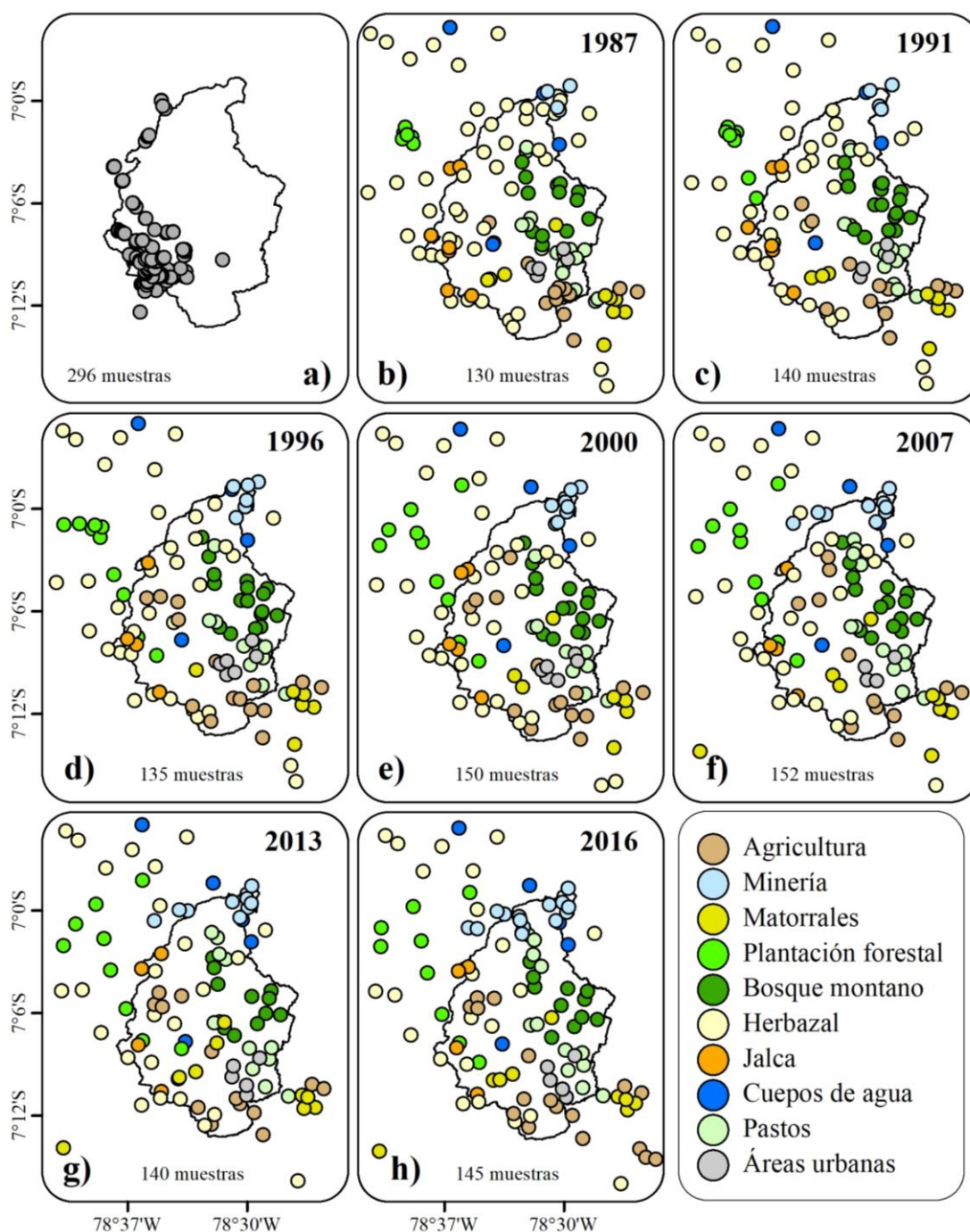


Figura 18 (a) Distribución de puntos recolectados en la campaña de campo del 2016 (b-h) Distribución de muestras para la etapa de entrenamiento del modelo clasificador.

Fuente: Elaboración propia.

Además, en la **Figura 18** se expone la distribución de muestras utilizadas para la etapa de entrenamiento, donde el número de ellos oscila entre 130 y 150 según sea el año cartografiado (1987-2016). La selección de dichas muestras se basó en los datos recolectados en las campañas de campo y muestras virtuales ubicadas en el entorno de Google Earth.

4.2. Metodología

4.2.1. Preprocesamiento de las imágenes multiespectrales

– Calibración radiométrica

Cada una de las siete escenas Landsat (path09 row65) (**Tabla 3**) – en niveles digitales – fueron calibradas radiométricamente a valores físicos de reflectividad TOA. Esto, a partir de las ecuaciones propuestas por el **IGAC -CIAF (2013) (Ecu. 1)** y **Chander et al. (2009) (Ecu. 2 y 3)** para las imágenes de los sensores TM y OLI respectivamente.

– Corrección geométrica

En esta investigación no se realiza tanto la corrección como el ajuste geométrico debido a que los productos de la colección Landsat (L1T) cuentan con una corrección de terreno estándar; en consecuencia, los píxeles se superponen temporalmente unos a otros.

– Corrección atmosférica

Con el objetivo de minimizar el ruido espectral causado por los efectos de absorción (absorbing), dispersión (scattering) y refracción (refracting) de la energía (incidente y reflejada) en la atmósfera, se decidió ejecutar el modelo de corrección atmosférica *Quick Atmospheric Correction* del software ENVI 5.3 (**Bernstein et al., 2012**) debido a que trabaja con el rango de longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano a través del infrarrojo de onda corta; además, determina los parámetros de corrección directamente de los espectros de píxel observado sin necesidad de información auxiliar. Todo lo anterior, haciendo uso de una librería de representantes espectrales puros llamados “**enbembers**”. Al finalizar esta corrección, los valores de todas las bandas espectrales fueron consideradas como reflectividad absoluta o de superficie. Asimismo, los valores de salida (0-10000) fueron normalizados con la **Ecu.4**.

– Corrección topográfica

Como parte final de la etapa de preprocesamiento se realizó la corrección topográfica con el objetivo de minimizar los efectos de las sombras, causadas por las condiciones de iluminación en el instante de la captura de cada imagen multiespectral. Esta corrección fue realizada haciendo uso de códigos programados en lenguaje R. Los cuales permitieron ejecutar la primera y segunda etapa del algoritmo **Civco (1989)**.

Primero fue necesario realizar un doble filtro de paso bajo (kernel 3x3) al MED – para disminuir los errores introducidos en la producción del modelo – seguido del remuestreo

según las características geométricas (extensión, proyección y tamaño de pixel) de cada escena Landsat.

Segundo, se simularon las condiciones de iluminación a partir de la **Ecu. 5 (Civco, 1989; Colby, 1991)**. Los parámetros: ángulos cenital y acimutal se obtuvieron de los metadatos (archivos “_MTL.txt”) de las imágenes multiespectrales. Los ángulos de pendiente y aspecto fueron obtenidos a partir del MED. Los resultados del modelo que en teoría varían entre -1.0 y +1.0 fueron escalados a rangos de brillo de 8 bits (de 0 a 255 niveles de gris).

La primera etapa del modelo **Civco (1989)** – transformación lineal de cada banda espectral TM y OLI – consistió en la normalización topográfica de las imágenes por medio de la **Ecu.7**.

El haber sido esta primera etapa de normalización sólo un éxito parcial, debido a que el ruido espectral de las sombras no fue removido por completo (**Figura 19**), se optó por la segunda etapa de modelo.

Al igual que en otros métodos de corrección topográfica avanzados, diversos autores han indicado que es necesario estimar parámetros por tipo de cubierta presente en el área estudio (**Kobayashi & Sanga-Ngoie, 2009; McDonald, Wu, Accetta, & Campbell, 2000**). Sin embargo, al tener la cobertura terrestre una importante variabilidad estacional y temporal – especialmente en zonas altoandinas – la separación se basó en un umbral de NDVI proveniente de cada imagen Landsat. Por lo tanto, se calcularon los coeficientes de corrección ($NDVI \geq 0,8$ y $NDVI < 0,8$) mediante la **Ecu. 13**:

$$C_{\lambda} = \frac{\left[\frac{\mu_{\lambda} - N_{\lambda}}{\mu_{\lambda} - N_{\lambda}} - (\mu_{\lambda} - N'_{\lambda}) \right] + \left[\frac{\mu_{\lambda} - S_{\lambda}}{\mu_{\lambda} - S_{\lambda}} - (\mu_{\lambda} - S'_{\lambda}) \right]}{2} \dots (Ecu. 13)$$

Donde:

C_{λ} es el coeficiente de corrección para cada banda λ por tipo de cobertura, μ_{λ} es la media global de reflectividad para cada banda λ por tipo de cobertura, N_{λ} es la media de reflectividad para cada banda λ por tipo de cobertura ubicada en sombra, en la imagen sin corregir, N'_{λ} es la media de reflectividad para cada banda λ por tipo de cobertura ubicada en sombra, en la imagen normalización (primera etapa), S_{λ} es la media de reflectividad para cada banda λ por tipo de cobertura ubicada en solana, en la imagen sin corregir, y S'_{λ} es la media de reflectividad para cada banda λ por tipo de cobertura ubicada en solana, en la imagen normalización (primera etapa).

Posterior al cálculo de los coeficientes de corrección por tipo de cobertura y banda espectral, se procedió a ejecutar la ecuación de normalización de la segunda etapa del modelo Civco (**Ecu. 14**).

$$\delta\rho_{\lambda ij} = \rho_{\lambda ij} + \left(\left(\rho_{\lambda ij} \times \left(\frac{\cos \bar{\gamma} - \cos \gamma_{ij}}{\cos \bar{\gamma}} \right) \right) \times C_{\lambda} \right) \dots (Ecu. 14)$$

Donde:

$\delta\rho_{\lambda ij}$ es la reflectividad normalizada de un $pixel_{ij}$ en la segunda etapa, en la banda λ ; $\rho_{\lambda ij}$ es la reflectividad de un $pixel_{ij}$ en la primera normalización, en la banda λ , $\cos \bar{\gamma}$ es el valor promedio del modelo de iluminación escalado (0 – 255) de iluminación, $\cos \gamma_{ij}$ es el valor de iluminación escalada (0 – 255) por $pixel_{ij}$. y C_{λ} el coeficiente de corrección empírico por tipo de cobertura y banda λ tanto en sombra como en solana.

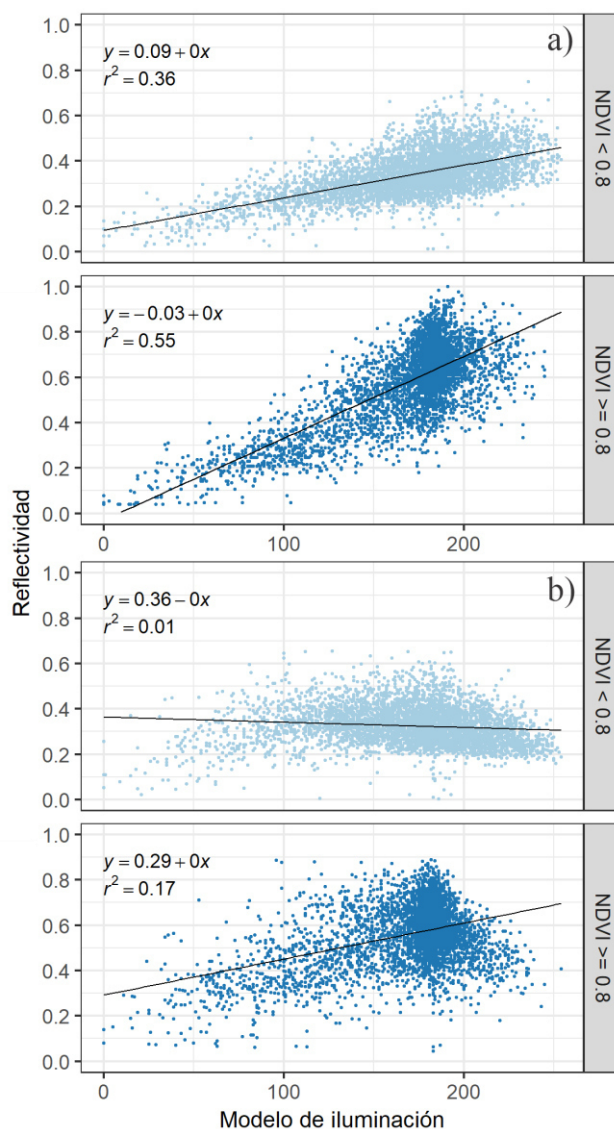


Figura 19] Regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 muestras aleatorias de valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen TM del 10 de agosto de 1987. a) imagen no normalizada y b) normalizada en la primera etapa.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se logró la reducción de gran parte del ruido espectral introducido por el efecto de las sombras en las imágenes. Esto se evidencia en la regresión lineal de la

Figura 20, donde la correlación disminuye a cero desde la normalización en la primera etapa hasta la segunda.

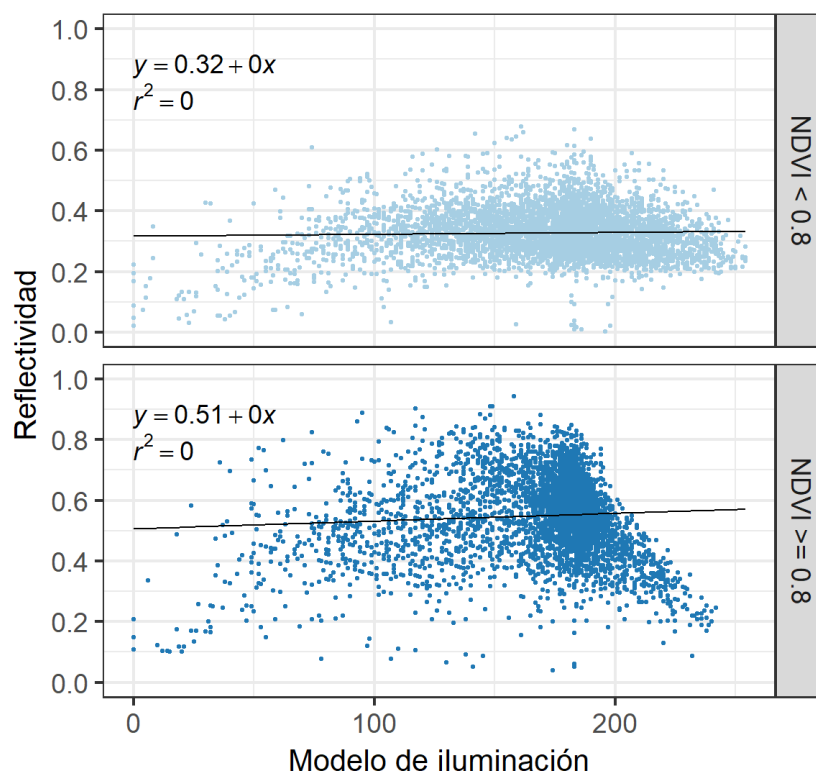


Figura 20 Regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 muestras aleatorias de valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen TM del 10 de agosto de 1987. (A) normalizada en la primera etapa y (B) normalizada en la segunda etapa.

Fuente: Elaboración propia.

Además, en la **Figura 21** se muestran gráficos de barras donde la correlación entre el modelo de iluminación y las bandas espectrales disminuyen posterior a cada etapa de la corrección topográfica; se revela también que la desviación estándar de la reflectividad disminuye y evidencia la homogenización espectral de los píxeles con el mismo tipo de cobertura.

Hasta este punto se ha mostrado la validación de la corrección topográfica de la imagen Landsat 5TM de 1987. En **Anexo 1-6** se muestran las regresiones lineales y gráficos de barras de validación de las imágenes de 1991, 1996, 2000, 2007, 2013 y 2016.

Por último, a partir de una muestra aleatoria de 3000 píxeles. Los mismos que fueron tomados para generar el gráfico de barras. Se construyó la **Tabla 5**, donde se presentan las medias de las reflectividades (sombra y solana) para cada una de las bandas a través de las dos etapas de normalización.

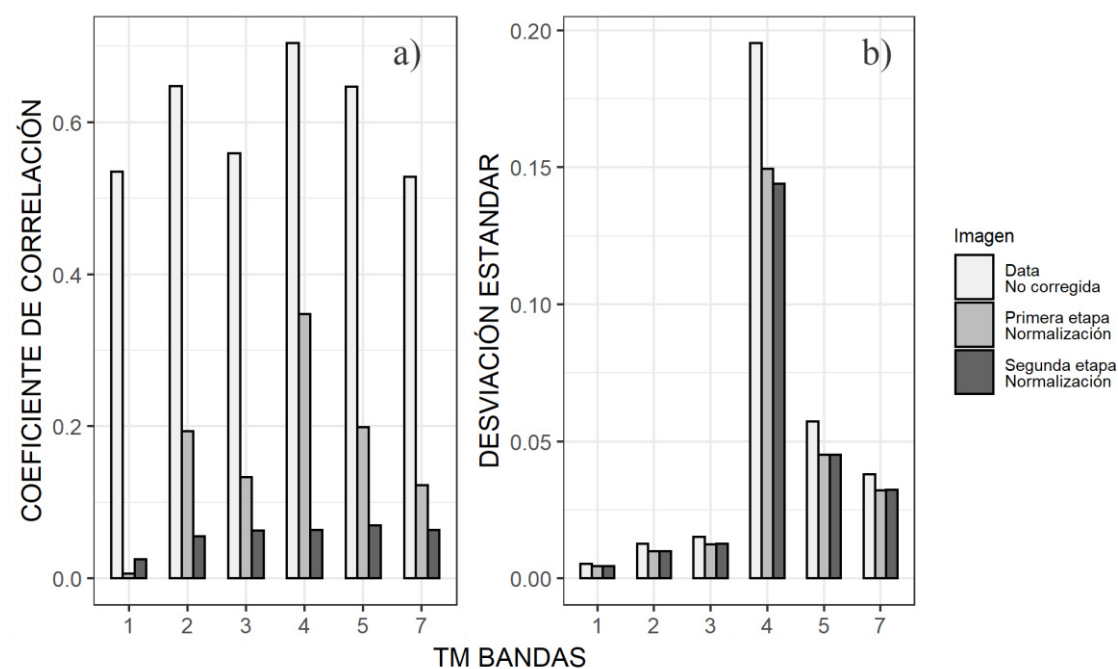


Figura 21] Variación del a) coeficiente de correlación (reflectividad - el modelo de iluminación) y b) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con NDVI ≥ 0.8 antes y después a la primera y segunda normalización de la imagen TM del 10 de agosto de 1987, bajo una muestra de 3000 píxeles.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5] Respuesta espectral (reflectividad escalada a valores entre 0 y 10000) promedio por banda para NDVI ≥ 0.8 en sombra y solana, bajo una muestra de 3000 píxeles.

Fuente: Elaboración propia.

10 agosto 1987, Landsat 5TM						
Banda	Sin Normalizar		Normalización Primera etapa		Normalización Segunda etapa	
	sombra	solana	sombra	solana	sombra	solana
	μ	μ	μ	μ	μ	μ
Blue	149,7	219,3	199,3	201,7	195	203,8
Green	254,7	432,2	335	397,1	364,3	385,9
Red	307,5	496,5	403,7	455,7	425,2	448,2
NIR	3371,3	6347,5	4418	5835,1	5153,9	5503,8
SWIR	1172,7	1965,9	1538,3	1804,1	1660,2	1757,2
SWIR2	753,9	1209,5	987,9	1108,6	1035,4	1092

Por último, fue necesario aplicar un filtro de relleno para aquellos píxeles con valores de reflectividad absoluta negativos a partir del promedio simple (kernel 3x3) en cada banda.

4.2.2. Segmentación espectral

Como base para la clasificación digital orientada a objetos fue necesario la discretización de las siete escenas Landsat en unidades denominadas segmentos u objetos (**Figura 22**). Cuya característica principal está dada por la similitud espectral y espacial de los píxeles

que lo constituyen. Este proceso consistió en la agrupación de unidades espectralmente homogéneas, bajo los parámetros *Scale* y *Merge* (25 y 70) de la herramienta *Feature Extraction* del software ENVI 5.3. Estos parámetros se definieron a través de un ajuste de sensibilidad previo a la constitución del objeto, adecuando parámetros que formaran segmentos con correspondencia a la distribución de las coberturas. Tomando en cuenta que estos valores varían según la resolución espacial, espectral y radiométrica de las imágenes.

Como resultado de este proceso se obtuvieron los datos *Raster_Seg* y *Shape_Seg* en formato raster y shapefile respectivamente para cada una de las imágenes Landsat 5TM y 8OLI.

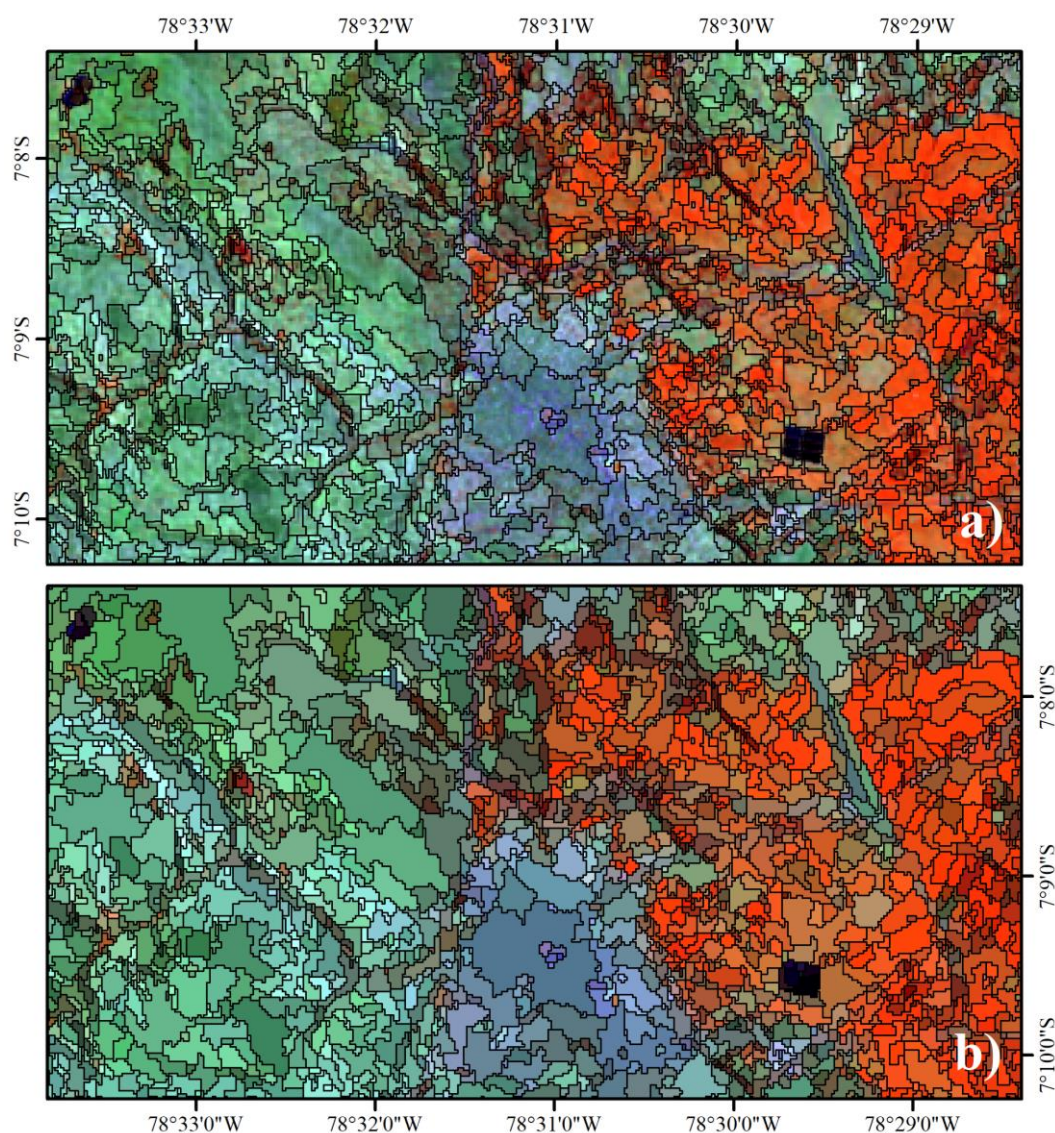


Figura 22 | Imagen del 10 de agosto de 1987 del sensor TM en composición de bandas 4-5-3. Vector lineal *Shape_Seg* en color negro. a) Imagen sin segmentar e b) Imagen segmentada *Raster_Seg*.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Generación de variables complementarias

Con el propósito de mejorar la discriminación entre los tipos de coberturas en la clasificación digital, fue necesario contar con variables predictoras complementarias, generadas a partir de las imágenes multiespectrales y el modelo de elevación digital.

– Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI (Rouse et al., 1974) (Figura 23) – para cada imagen – fue calculado a partir de la función *spectralIndices* del paquete *RStoolbox* (Benjamin, Horning, Schwalbwillmann, Hijmans, & Leutner, 2018) de R v3.4.2. Teniendo en consideración que el orden de las bandas espectrales tanto para las escenas del sensor TM y OLI son distintos.

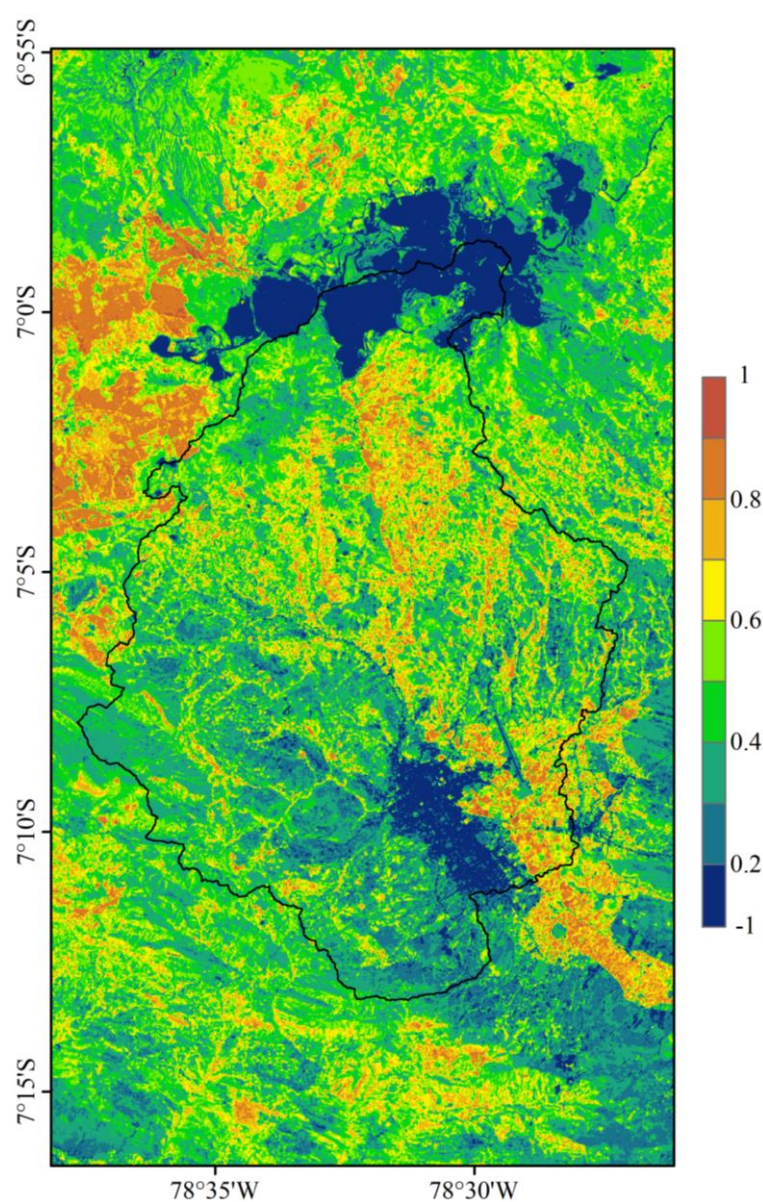


Figura 23 Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para la imagen Landsat OLI del 24 de julio de 2016 a lo largo de la cuenca del río Mashcón (línea negra).

Fuente: Elaboración propia.

– Transformación espectral Tasseled Cap

La función de transformación *tasseledCap* del paquete *RStoolbox* (Benjamin et al., 2018), del software R v3.4.2, fue utilizada para la obtención de los índices de brillo, verdor y humedad (bright, green y wet) (**Figura 24**) para cada escena. Usando los coeficientes de **Eric P. Crist (1985)** y **Baig, Zhang, Shuai, & Tong (2014)** para las imágenes Landsat 5TM y 8OLI respectivamente.

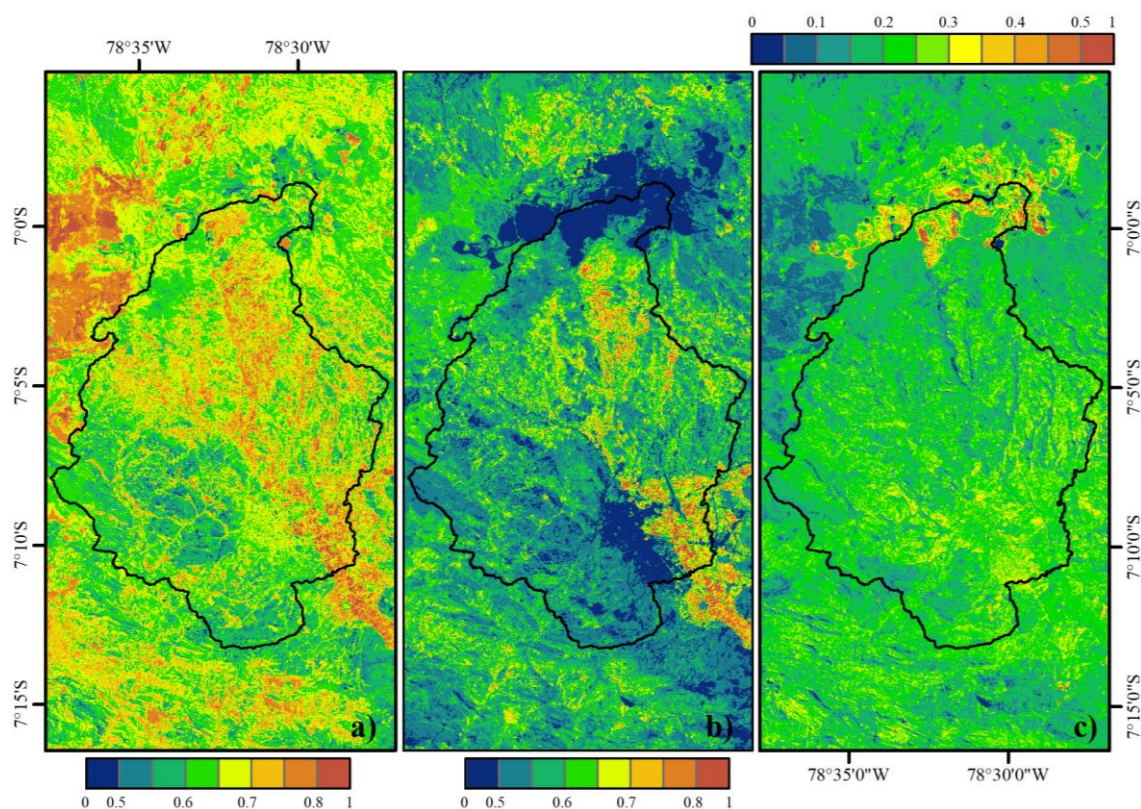


Figura 24 Transformación espectral Tasseled Cap para la imagen Landsat OLI del 24 de julio del 2016 a lo largo de la cuenca del río Mashcón (línea negra). a) índice de humedad - wetness, b) índice de verdor - greenness y c) índice de brillo - brightness.

Fuente: Elaboración propia.

– Modelo de elevación digital y modelo de pendientes

A partir del MED se calculó el modelo de pendiente (**Figura 25**), mediante la función *slopeAspect* del paquete *raster* (**Hijmans et al., 2017**) en R v3.4.2. Este último modelo fue calculado en unidades de grados sexagesimales

Al final, con un total de seis variables predictoras complementarias, de las cuales, cuatro de ellas se obtuvieron a partir de cada escena Landsat TM y OLI y los otros dos a partir del modelo de elevación digital, se procedió con la etapa de clasificación digital multivariadas.

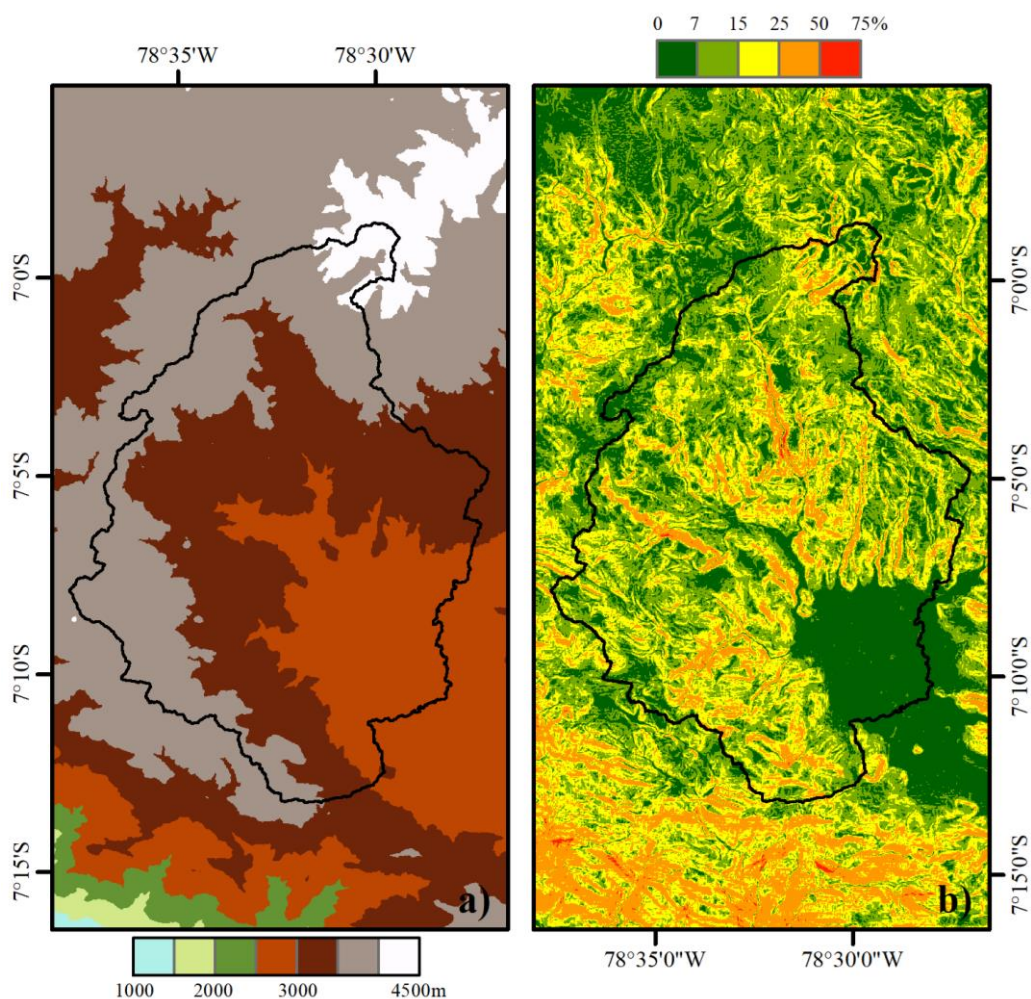


Figura 25 a) Modelo de elevación digital Alos Palsar 1 de 12.5 metros de resolución y b) el modelo de pendiente en grados sexagesimales.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Clasificación digital multivariable

Esta parte de la metodología está subdividida en tres etapas, las cuales han sido desarrolladas estrictamente bajo la plataforma del software R v3.4.2.

a) Primera etapa: Consistencia espacial y extracción de indicadores estadísticos

Dada la matriz numérica tabulada del producto “*Raster_Seg*” de cada imagen, se le aplicó un filtro de disolución en base al conjunto de valores de las bandas espectrales. Lo cual permitió compararla con la cantidad de objetos (features) existentes en el vector polígono “*Shape_Seg*”. Asegurando la consistencia del proceso de segmentación.

Seguido, se calcularon los indicadores estadísticos (media, desviación estándar, máximo y mínimo) de las variables complementarias para cada segmento en las imágenes. Cerciorándose previamente la coincidencia geométrica (extensión y resolución espacial)

entre los predictores multiespectrales y complementarios. Finalmente se obtuvo como único producto, en esta etapa, la tabla “*Stack_Data*” con todas las variables predictoras.

b) Segunda etapa: Entrenamiento del modelo clasificador

Esta segunda etapa comenzó con el cruce tabular de las áreas de entrenamiento “*ATraining*” con el producto “*Shape_Seg*” para extraer la información espectral y complementaria de cada uno de los segmentos que las contienen (**Figura 26**). De esta manera obtener como único producto el vector “*Training_Data*” que contiene tanto los valores extraídos anteriormente, como el tipo de cobertura y uso de tierra para cada segmento.

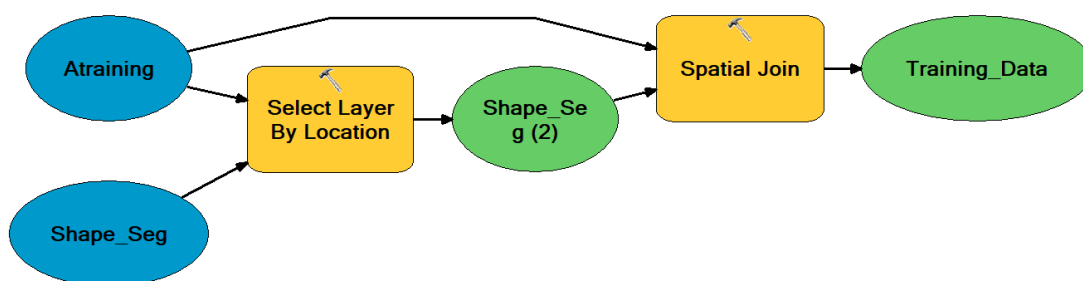


Figura 26 Diagrama de extracción de información espectral del producto *Shape_Seg* a partir de las áreas de entrenamiento *ATraining*. Elaborado con la herramienta ModelBuilder del software ArcGIS 10.3.

Fuente: Elaboración propia.

La ubicación y número de áreas de entrenamiento varían para cada una de las escenas Landsat 5TM y 8OLI (**Tabla 6**).

Tabla 6 Número de áreas de entrenamiento para cada imagen Landsat.

Fuente: Elaboración propia.

Imagen Landsat	Número de áreas de entrenamiento
LT 5TM / 1987-AUG-10	130
LT 5TM / 1991-AUG-10	140
LT 5TM / 1996-AUG-10	135
LT 5TM / 2000-AUG-10	150
LT 5TM / 2007-AUG-10	152
LT 8OLI / 2013-AUG-10	140
LT 8OLI / 2016-AUG-10	145

La identificación y posterior caracterización de las áreas de entrenamiento “*ATraining*” por tipo de cobertura y uso de tierra estuvieron basadas en la tabla de clasificación generada en el proyecto Europeo Corine Land Cover adaptado por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2014) (**Tabla 2**).

Seguido, se extraen los datos de las variables complementarias de *“Stack_Data”* en base al código de identificación *“REGION_ID”* contenido, también, en el producto *“Training_Data”*.

Una vez compiladas las variables espectrales y complementarias (indicadores estadísticos) en la tabla *“Training_Data”*, estas son entrenadas con el modelo de clasificación multivariable Random Forest (RF) (L. Breiman, 2001; Pal, 2005) bajo el entorno del software Rv3.4.2; a través de la función *“randomForest”* de los paquetes *“caret”* y *“randomForest”* (T. Breiman & Cutler, 2018). Construyendo en el proceso, un total de 500 árboles de decisión.

Además, como parte de la etapa de entrenamiento, se tabularon las variables predictoras según el grado de importancia dentro modelo. Permitiendo el descarte de variables que, en lugar de mejorar la predicción, entorpecieron la asignación de los segmentos a las categorías correctas.

Una vez definidas las variables predictoras a emplear en el modelo, se ejecutó nuevamente RF. Seleccionando aleatoriamente de la totalidad de las áreas de entrenamiento el 30% de ellos para una pre-validación del mismo y así evaluar su rendimiento, sin la necesidad de continuar a ciegas con la clasificación hasta la etapa de validación. Por ello, la justificación del porcentaje global de acierto y el índice Kappa calculado en el proceso. Por tal, es importante asegurarse que la cantidad de áreas de entrenamiento (segmentos) por tipo de cobertura, sea superior a diez.

El siguiente paso consistió en proyectar el modelo entrenado y predecir, para cada uno de los segmentos del archivo *“Stack_Data”* (conjunto de variables tabuladas), el tipo de cobertura y uso de tierra.

Finalmente, en base a las características geométricas de la imagen espectral original (proyección, tamaño de pixel, extensión, número de filas y columnas) se construye un archivo raster vacío que es llenado con los valores categóricos de la tabla *“Stack_Data”* predichos.

c) Tercera etapa: Validación de la clasificación y edición vectorial

Esta última etapa de la clasificación se centra en la validación del mapeo por cada unidad de cobertura. Para ello los resultados se someten a las pruebas de confiabilidad de matrices de confusión (Congalton, 1991) e índice de Kappa (Ecu. 15) (Cohen, 1960). Finalmente, los objetos asignados incorrectamente fueron corregidos durante la edición

vectorial, limitándose a 0.5 ha como unidad mínima de mapeo (UMM) para todas las coberturas.

$$kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \dots (Ecu. 15)$$

Donde:

P_o es la coincidencia relativa observada entre los datos evaluados y P_e es la probabilidad hipotética de coincidencia por azar, utilizando los datos observados para calcular las probabilidades de los datos clasificados a cada categoría. En caso exista coincidencia $kappa = 1$, de otro modo $kappa = 0$.

4.2.5. Análisis de Cambio de Cobertura y Uso de Tierra - LUCC

Para la cuantificación de los LUCC se calcularon: (1) el porcentaje de cambio total (PCT), (2) la tasa de cambio anual (TCA) y (3) el cambio de extensión por intervalos de elevación para cada cobertura identificada en la clasificación.

El PCT se basó en la **Ecu. 16**. Además, con fines de comparación de resultados con otros estudios se calculó la TCA, empleando la ecuación derivada de la ley de interés compuesto (**Ecu. 17**) sugerido por (**Puyravaud, 2003**), ya que no subestima la tasa anual de cambio cuando este es muy grande y acelerado.

$$PCT = \frac{S_2 - S_1}{S_{total}} \times 100\% \dots (Ecu. 16)$$

$$TCA = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \dots (Ecu. 17)$$

Donde:

PCT representa el porcentaje de cambio total (%), TCA es la tasa de cambio anual (%/yr), las áreas S_2 y S_1 representan al año final (t_2) e inicial (t_1) de cada intervalo de tiempo analizado.

Asimismo, para la presentación de resultados se construyeron matrices de tabulación cruzada o matrices de cambios (**Pontius, Shusas, & McEachern, 2004**) que nos permitieron distinguir la transición de las diferentes clases evaluadas y detectar patrones reales de LUCC.

Además, con fines de análisis de cambios a lo largo de la gradiente altitudinal, la cuenca fue dividida en rangos de elevación de 200 m. Para así identificar las posibles tendencias en extensión por cobertura a diferentes intervalos de altitud. Finalmente, se agruparon las clases en coberturas naturales (herbazales, Jalca, arbustales, bosque de montaña y cuerpos de agua) y no naturales relacionadas con la actividad del hombre (áreas de extracción minera, actividad agrícola, pastos cultivados, áreas urbanas y plantaciones forestales), para analizar los impactos generados desde un panorama general.

4.2.6. Esquema metodológico

En la **Figura 27** se muestra el procedimiento técnico – metodológico que siguieron las escenas Landsat (TM y OLI) en las etapas de pre–procesamiento, procesamiento y análisis de detección de cambio.

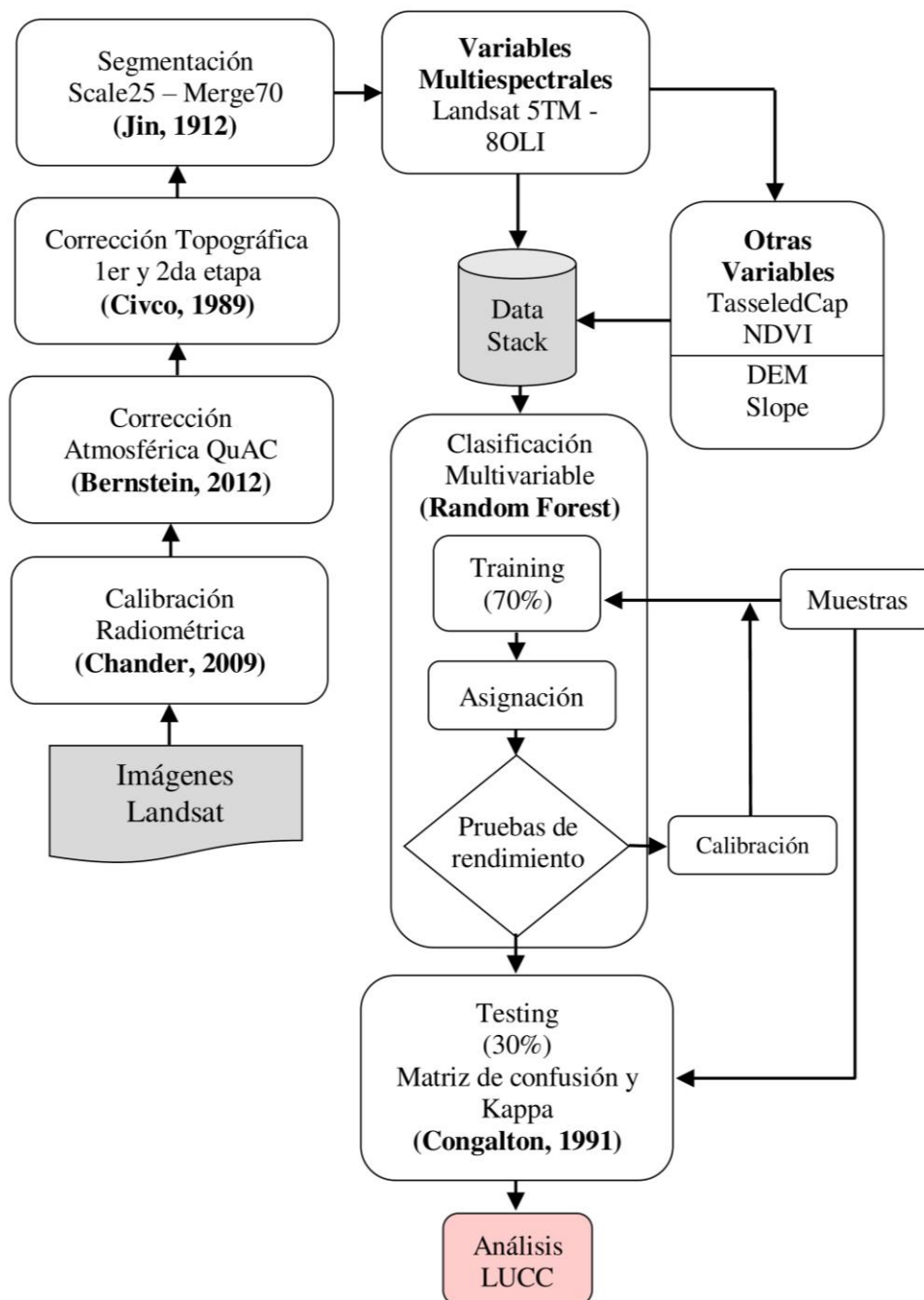


Figura 27 | Esquema metodológico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8| Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 1991.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación										Total	Precisión del usuario	kappa
Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua					
Predicción	Agricultura	3698	35	0	140	0	37	0	0	792	0	4702	0.79	
	Herbazal	178	31444	0	31	663	0	119	0	0	0	32435	0.97	
	Minería	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	47	1.00	
	Bosques montanos	0	0	0	1869	0	0	0	0	0	0	1869	1.00	
	Jalca	0	132	0	0	691	0	0	0	0	0	823	0.84	
	Pastos	69	6	0	0	0	7603	0	0	8	0	7686	0.99	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	433	0	0	0	433	1.00	
	Plantación forestal	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	45	1.00	
	Área urbana	0	0	0	0	0	0	0	0	4194	0	4194	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	90	1.00	
Total	3945	31617	47	2040	1354	7640	552	45	4994	90	-	-		
Precisión del productor	0.94	0.99	1.00	0.92	0.51	1.00	0.78	1.00	0.84	1.00	-	95.78%		
kappa													0.928	

Tabla 9] Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 1996.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación										Total	Precisión del usuario	kappa
Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua					
Predicción	Agricultura	6150	22	0	212	0	0	0	0	651	0	7035	0.87	
	Herbazal	401	34606	0	9	219	0	112	0	0	0	35347	0.98	
	Minería	0	0	282	0	0	0	0	0	0	0	282	1.00	
	Bosques montanos	0	0	0	1875	0	0	0	35	0	0	1910	0.98	
	Jalca	0	0	0	0	1050	0	0	0	0	0	1050	1.00	
	Pastos	350	0	0	0	0	5305	0	0	3	0	5658	0.94	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	408	0	0	0	408	1.00	
	Plantación forestal	0	1	0	0	0	0	0	176	0	0	177	0.99	
	Área urbana	0	0	0	0	0	0	0	0	5120	0	5120	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109	109	1.00	
Total	6901	34629	282	2096	1269	5305	520	211	5774	109	-	-		
Precisión del productor	0.89	1.00	1.00	0.89	0.83	1.00	0.78	0.83	0.89	1.00	-	96.47%		
kappa														

kappa

Tabla 10| Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 2000.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación										Total	Precisión del usuario	kappa
Agricultura	Herbaza	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua					
Predicción	Agricultura	8337	5	0	217	0	19	0	0	0	0	8578	0.97	
	Herbaza	418	28263	0	8	211	16	39	0	0	0	28955	0.98	
	Minería	0	0	480	0	0	0	0	0	0	0	480	1.00	
	Bosques montanos	0	22	0	2048	0	0	0	35	0	0	2105	0.97	
	Jalca	0	0	0	0	877	0	0	0	0	0	877	1.00	
	Pastos	80	0	0	0	0	6195	0	0	0	0	6275	0.99	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	262	0	0	0	262	1.00	
	Plantación forestal	0	0	0	0	0	0	0	199	0	0	199	1.00	
	Área urbana	5	0	0	0	0	0	0	0	3155	0	3160	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116	116	1.00	
Total	8840	28290	480	2273	1088	6230	301	234	3155	116	-	-		
Precisión del productor	0.94	1.00	1.00	0.90	0.81	0.99	0.87	0.85	1.00	1.00	-	97.89%		
kappa														

0.967

Tabla 11| Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 2007.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación										Total	Precisión del usuario	kappa
Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua					
Predicción	Agricultura	4403	0	0	179	0	445	0	0	302	0	5329	0.83	
	Herbazal	240	23676	0	117	56	0	47	3	0	0	24139	0.98	
	Minería	0	0	218	0	0	0	0	0	0	0	218	1.00	
	Bosques montanos	0	0	0	2249	0	0	0	50	0	0	2299	0.98	
	Jalca	0	0	0	0	826	0	0	0	0	0	826	1.00	
	Pastos	48	0	0	3	0	3409	0	0	0	0	3460	0.99	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	272	0	0	0	272	1.00	
	Plantación forestal	0	0	0	68	0	0	0	189	0	0	257	0.74	
	Área urbana	15	0	0	0	0	0	0	0	5797	0	5812	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97	97	1.00	
Total	4706	23676	218	2616	882	3854	319	242	6099	97	-	-		
Precisión del productor	0.94	1.00	1.00	0.86	0.94	0.88	0.85	0.78	0.95	1.00	-	91.61%		
kappa													0.871	

Tabla 12| Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación												
		Agricultura	Herbazonal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	Total	Precisión del usuario	kappa
Predicción	Agricultura	10948	94	0	112	0	9	10	17	105	0	11295	0.97	
	Herbazonal	372	26877	0	23	65	0	68	7	0	0	27412	0.98	
	Minería	0	0	286	0	0	0	0	0	0	0	286	1.00	
	Bosques montanos	0	0	0	1879	0	0	0	0	0	0	1879	1.00	
	Jalca	0	43	0	0	818	0	0	0	0	0	861	0.95	
	Pastos	546	0	0	0	0	6056	0	0	0	0	6602	0.92	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	401	0	0	0	401	1.00	
	Plantación forestal	0	0	0	45	0	0	0	313	0	0	358	0.87	
	Área urbana	8	0	0	0	0	0	0	0	8511	0	8519	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85	85	1.00	
Total	11874	27014	286	2059	883	6065	479	337	8616	85	-	-		
Precisión del productor	0.92	0.99	1.00	0.91	0.93	1.00	0.84	0.93	0.99	1.00	-	93.99%		
kappa		0.915												

Tabla 13 | Matriz de confusión (unidad de píxeles) e índice de kappa para la clasificación de cobertura y uso de tierra del año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra		Observación										Total	Precisión del usuario	kappa
		Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua			
Predicción	Agricultura	5934	20	0	196	0	0	55	0	62	0	6267	0.95	
	Herbazal	338	19850	0	27	90	0	21	0	0	0	20326	0.98	
	Minería	0	0	581	0	0	0	0	0	0	0	581	1.00	
	Bosques montanos	0	7	0	1932	0	0	0	39	0	0	1978	0.98	
	Jalca	0	0	0	0	781	0	0	0	0	0	781	1.00	
	Pastos	124	0	0	0	0	4134	0	0	0	0	4258	0.97	
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	657	0	0	0	657	1.00	
	Plantación forestal	0	7	0	39	0	0	0	257	0	0	303	0.85	
	Área urbana	0	0	0	0	0	0	0	0	9419	0	9419	1.00	
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	59	1.00	
Total	6396	19884	581	2194	871	4134	733	296	9481	59	-	-		
Precisión del productor	0.93	1.00	1.00	0.88	0.90	1.00	0.90	0.87	0.99	1.00	-	93.73%		
kappa		0.914												

5.2. Mapas de Cobertura y Uso de Tierra

Previo a la descripción de cada uno los mapas CUT y sus cambios, es necesario mencionar que estos están agrupados en coberturas naturales (herbazal, bosque montano, jalca, matorrales y cuerpos de agua) y no naturales (áreas agrícolas, pastos, áreas de extracción minera, áreas urbanas y plantaciones forestales). Para los cuales se muestran los cambios cuantitativos (**Tabla 14** y **Figura 28**) y espaciales (**Figura 29**) a lo largo de la cuenca del río Mashcón.

En la **Tabla 14** se presentan a las diez unidades de CUT agrupadas en coberturas naturales y no naturales. Donde claramente se aprecia que sus proporciones respecto al área global variaron gradualmente (**Figura 28**), mostrando una reducción e incremento del 35.57% (11,088.7 ha) entre 1987 y 2016. Siendo las coberturas relacionadas con las actividades extractivo-productivas las que dinamizaron el cambio dentro de la cuenca.

Tabla 14 Superficie de coberturas naturales y no naturales en unidad de porcentaje del área total de la cuenca del río Mashcón.

Fuente: Elaboración propia.

	1987 (%)	1991 (%)	1996 (%)	2000 (%)	2007 (%)	2013 (%)	2016 (%)
Cobertura Natural	76.77	70.22	65.08	58.39	55.64	45.69	41.2
Cobertura No Natural	23.23	29.76	34.93	41.61	44.38	54.3	58.8

Una de las características peculiares de este estudio es que las coberturas “no naturales” están representadas mayoritariamente por áreas agrícolas, que en conjunto con el cultivo de pastos con fines ganaderos y las áreas de extracción de minerales son considerados los principales forzantes de la aceleración de la dinámica de cambios de cobertura y uso de tierra en la cuenca, así como en otras regiones Andino-Tropicales. Es así que con ~25% (7,793.6ha) de la superficie total en 1987 y ~60% (187,004.6ha) (**Figura 28b**) en el 2016 se demuestra, desde un panorama general, que su dinámica de cambio tiene una tasa de cambio positiva (**Figura 28a**). Además, es meritorio resaltar que desde el 2010 (**Figura 28a**) inició la desproporción entre ambos grupos de coberturas; convirtiendo a la cuenca del río Mashcón en una región sobreexplotada.

La distribución espacial del cambio (**Figura 29**) muestra la concentración de áreas artificializadas en la parte baja de la cuenca (valle, 2600-2800msnm); donde actualmente se asienta la ciudad de Cajamarca, rodeada del cultivo de pastos con fines agropecuarios.

Además, es notoria la depredación de áreas naturales en la cuenca media y cabecera de cuenca de la región noroeste, noreste y norte del área de estudio, respectivamente. Afectando principalmente a las subcuencas de los ríos Porcón y río Grande (**Figura 10**).

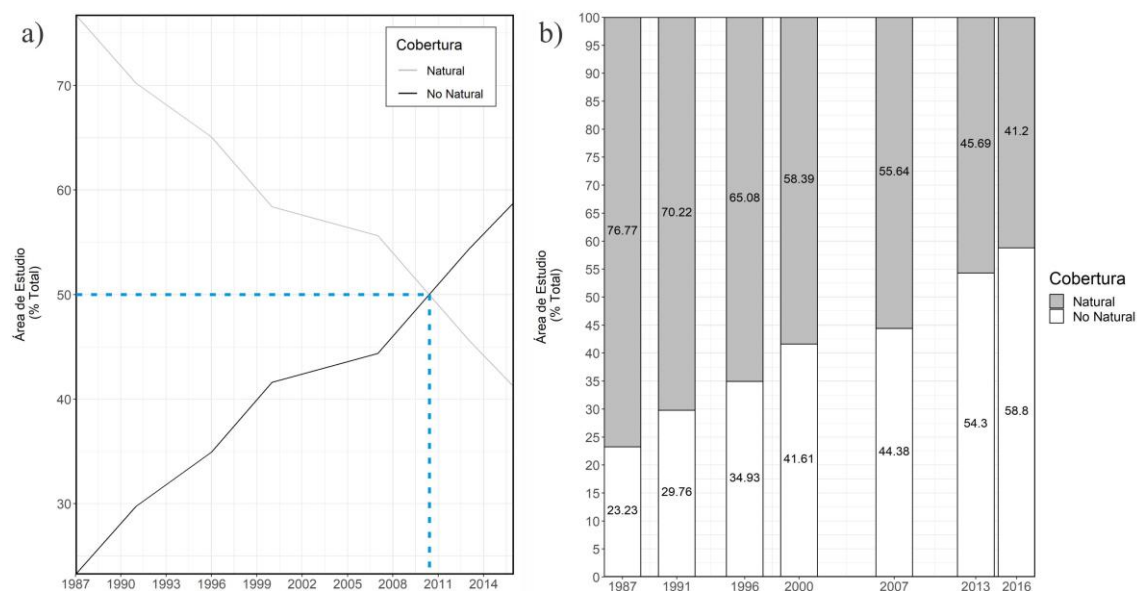


Figura 28 Evolución de cambio entre coberturas naturales y no naturales. a) tendencias de cambio en porcentaje de área total y b) proporcionalidad de superficie para cada año de análisis.

Fuente: Elaboración propia.

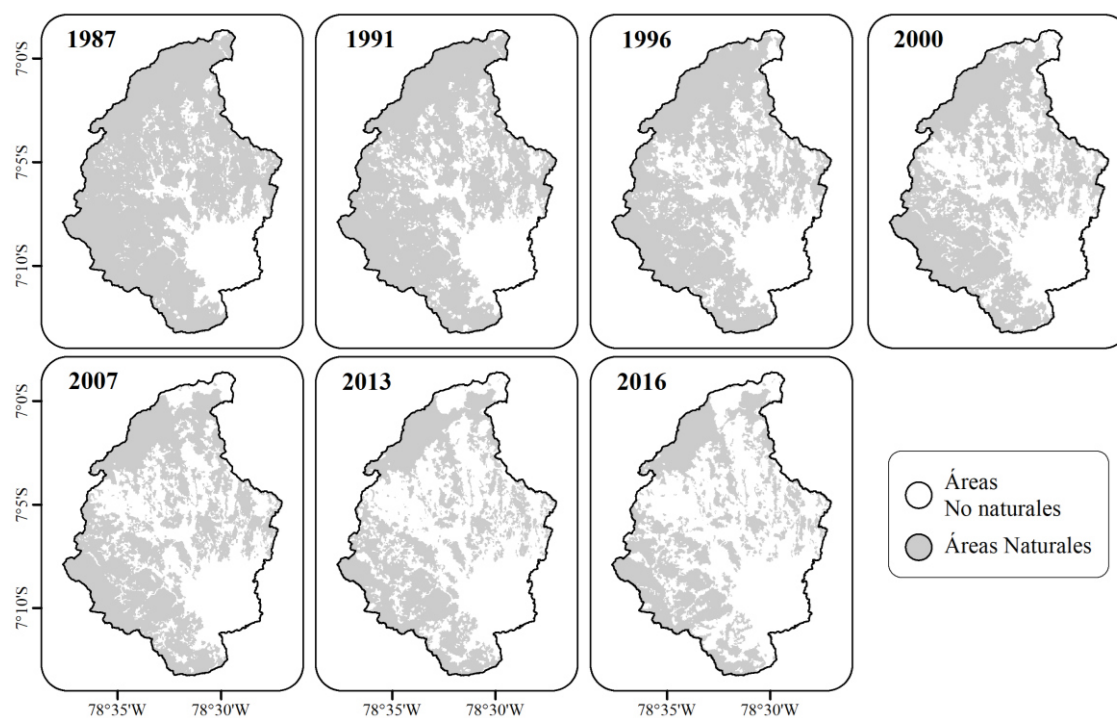


Figura 29 Espacialización de cobertura natural y no natural a lo largo de toda la cuenca del río Mashcón, para los años 1987, 1991, 1996, 2000, 2007, 2013 y 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Durante estas tres últimas décadas, sólo en el sub-período 2007 - 2013 se presentaron cambios del 10% (3,117.4ha) (**Figura 30**). Por otro lado, entre el 2000 y 2007, que, a pesar de ser el sub-período más largo analizado, es el que presentó menor dinámica de cambio (~3% o 935.2ha) en comparación con el sub-período 2013-2016 (~4.5%, 1,402.8ha) (**Figura 30**),

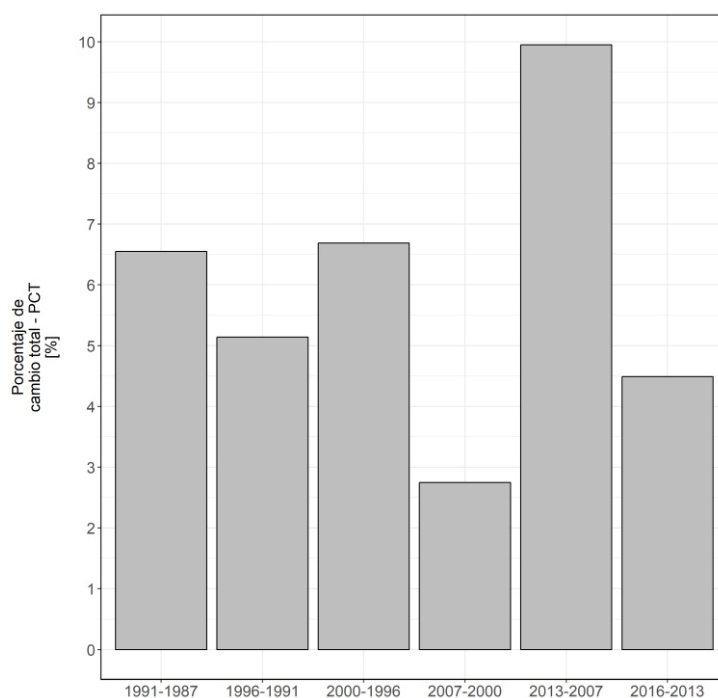


Figura 30] Porcentaje de cambio total (PCT) para cada sub-período entre 1987-2016.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describirán cada una de las siete cartografías elaboradas en esta investigación. Siendo la extensión y la distribución espacial, por tipo de CUT, los puntos principales a tratar. Sin embargo, es necesario mencionar que los mapas fueron obtenidos durante la estación seca (junio y septiembre) (**Tabla 4**); por lo tanto, es probable que la representación de cada unidad de cobertura natural, dependientes de la estacionalidad de las lluvias, sea subestimada en términos de extensión¹.

En 1987, la cobertura herbazal fue la que predominó en la cuenca del río Mashcón (72.33%, **Figura 31**), ubicada por sobre los 3000 msnm en la región oeste y noroeste del área de estudio (**Figura 32**). Seguido: los bosques montanos, localizados sobre la cuenca media, en la región norte y noreste, representan el 2.55%; la Jalca, ecosistema altoandino que se ubica en la cabecera de cuenca oeste y noroeste es únicamente el 1%; y los cuerpos de agua, por su parte, son representados por lagunas ubicadas en la región extremo norte

¹ Al respecto, se tratará en el Capítulo 6: Discusiones

junto con la laguna de Chamis al noroeste de la ciudad de Cajamarca (0.04%, **Figura 31 y 32**). Por otro lado, entre los tipos de coberturas introducidos por la actividad antrópica tenemos a: la agricultura, que con el 13.61% es la de mayor extensión (**Figura 31**); cultivo de pastos con el 8.16% (**Figura 31**); áreas urbanas concentradas en el valle de la cuenca (**Figura 32**), con el 1.39% (**Figura 31**). Por último, en la década de los 80's, la actividad minera y las plantaciones forestales, juntos, representaron menos del 0.01% (**Figura 31**).

Cuatro años después, en 1991, la extensión de herbazales se redujo al 65.77% (**Figura 31**); sin embargo, las demás coberturas naturales mantuvieron sus extensiones respecto a 1987. Por otra parte, las áreas agrícolas se incrementaron en las regiones noroeste, norte y noreste de la cuenca (18.97%, **Figura 31 y 32**), lo mismo con el cultivo de pastos y el ligero incremento del área urbana. Es el inicio de la década de los 90's y la actividad minera y plantaciones forestales aún no desarrollan cambios significativos (**Figura 31**).

En 1996, las superficies que cubren los herbazales continuó siendo depredada hasta llegar al 60.85% del área total de la cuenca (**Figura 31**). Lo mismo sucedió con los bosques montanos (2.36%) y matorrales (0.83%), pero en mínimas cantidades (**Figura 31**). El número de cuerpos de agua sufrió una pérdida en la zona norte, pero mantuvieron el 0.04% (**Figura 31**) debido al aumento, en dimensión, de la laguna Chamis (cambios estacionales en su extensión) (**Figura 33**). Por el contrario, las áreas agrícolas (22.35%) y de pastos (9.25 %) fueron las más beneficiadas (**Figura 31**), extendiéndose con el mismo patrón espacial que en años anteriores; además, la expansión del área urbana continuó (1.84%, **Figura 31**). En esta ocasión, ya a mediados de los 90's, hubo un pequeño incremento porcentual, respecto a la extensión de la cuenca, pero significativo, de la actividad minera (1.17%) y plantaciones forestales (0.32) (**Figura 31**) al norte y este del área de estudio respectivamente, ya que es notoria la presencia de ambas en el mapa de CUT de este año (**Figura 33**).

En el año 2000, la extensión de herbazales pasó a representar el 54.35% (**Figura 31**) de la cuenca. La cobertura de bosques montanos, en altitudes medias al norte de la ciudad de Cajamarca (**Figura 33**), se vio reducida a 2.22% (**Figura 31**). Esta misma tendencia se mostró con los matorrales y los cuerpos de agua; las Jalcas conservaron su extensión. La agricultura ganó más territorio para su actividad (26.18%, **Figura 31**); las áreas de extracción minera (2.39%, **Figura 31**) consolidaron su posicionamiento al norte de la cuenca (**Figura 33**). Por último, existió un ligero crecimiento de las áreas urbanas (2%)

y plantaciones forestales (0.43%) (**Figura 31**) en el valle y región oeste del área de estudio respectivamente (**Figura 33**).

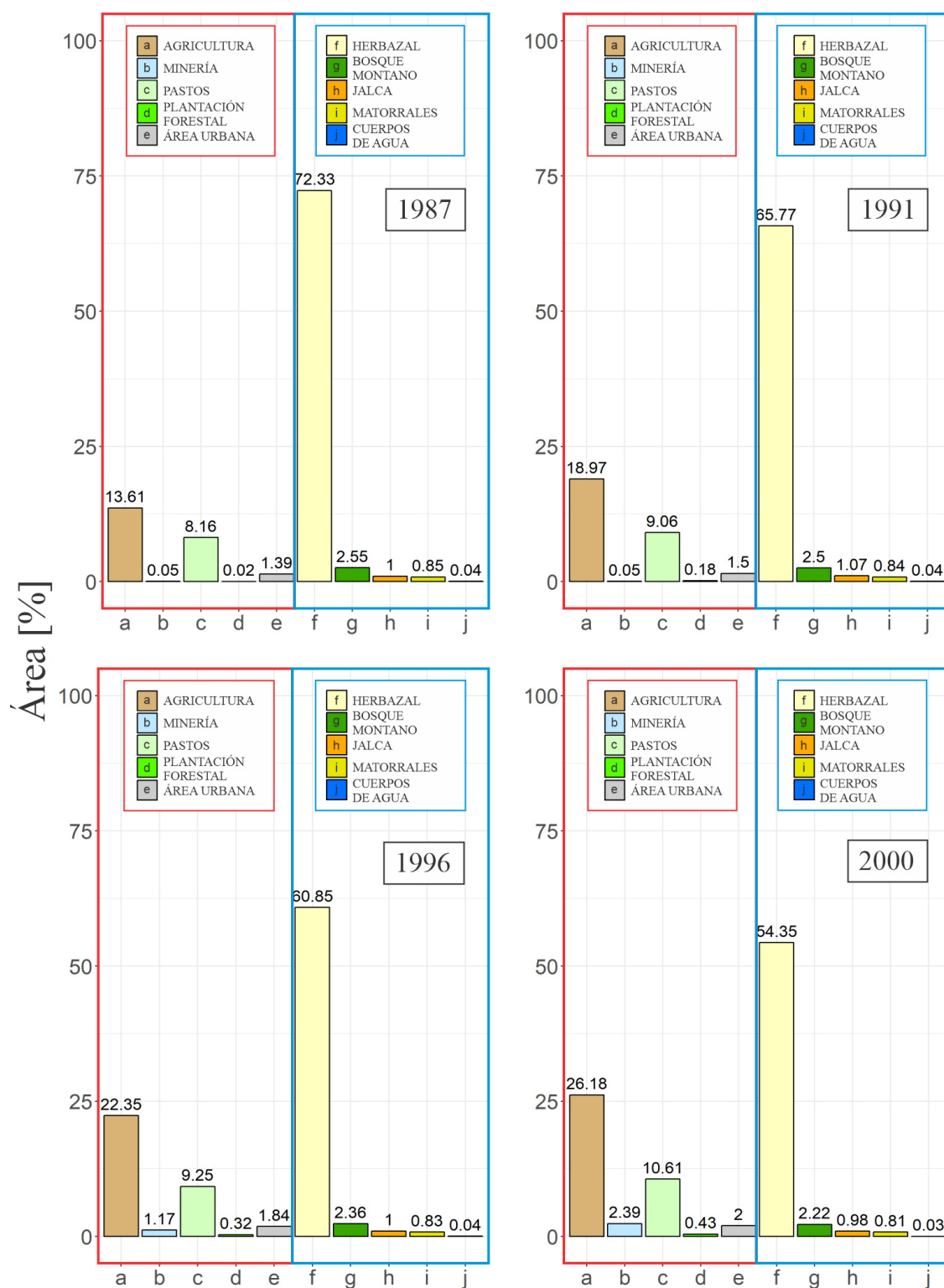


Figura 31 Gráficos de barras de cobertura y uso de tierra en la cuenca del río Mashcón, para los años 1987, 1991, 1996 y 2000; agrupados en coberturas no naturales (izquierda - rojo) y naturales (derecha - azul).

Fuente: Elaboración propia.

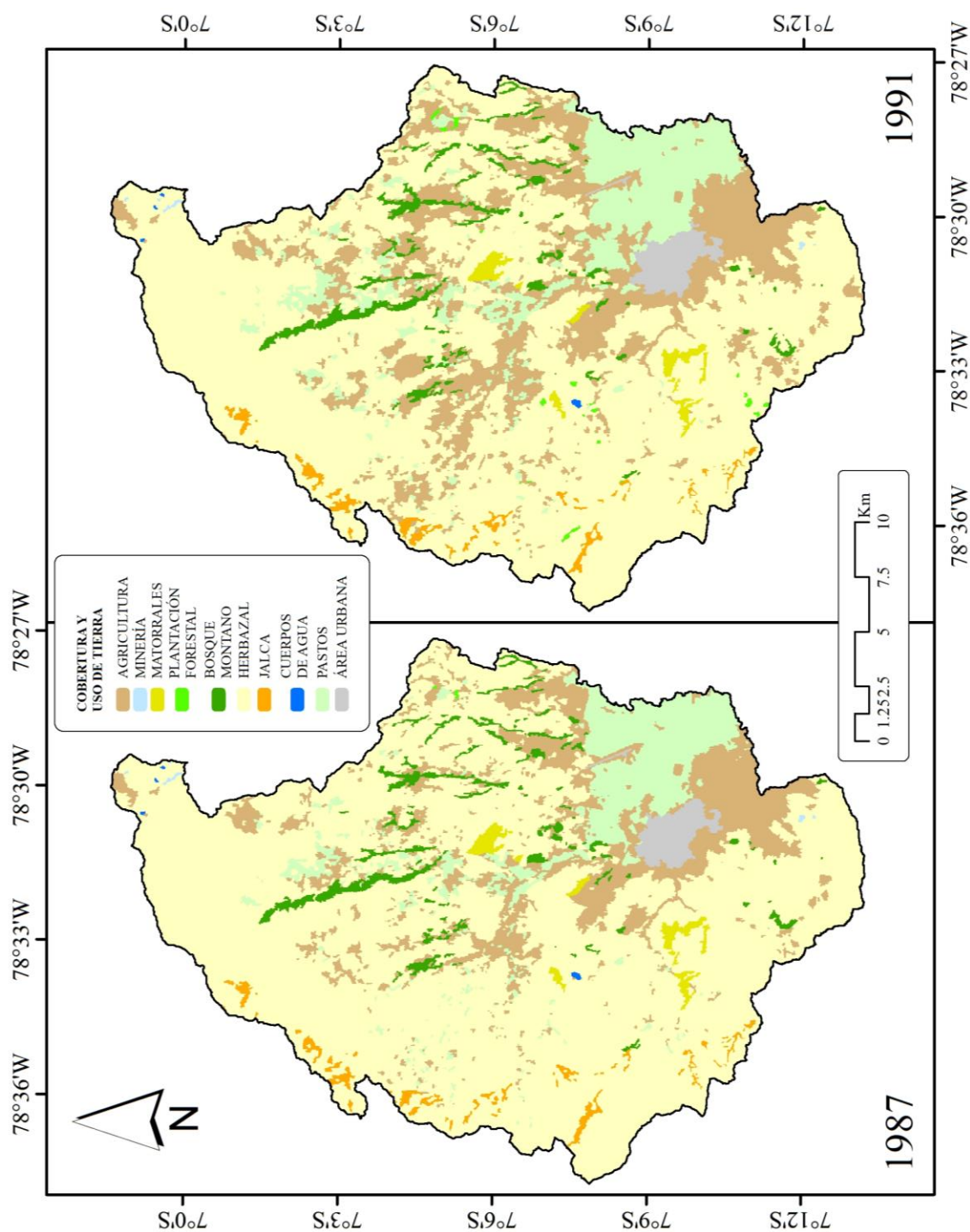


Figura 32 Mapas de cobertura y uso de tierra para los años 1987 y 1991.

Fuente: Elaboración propia.

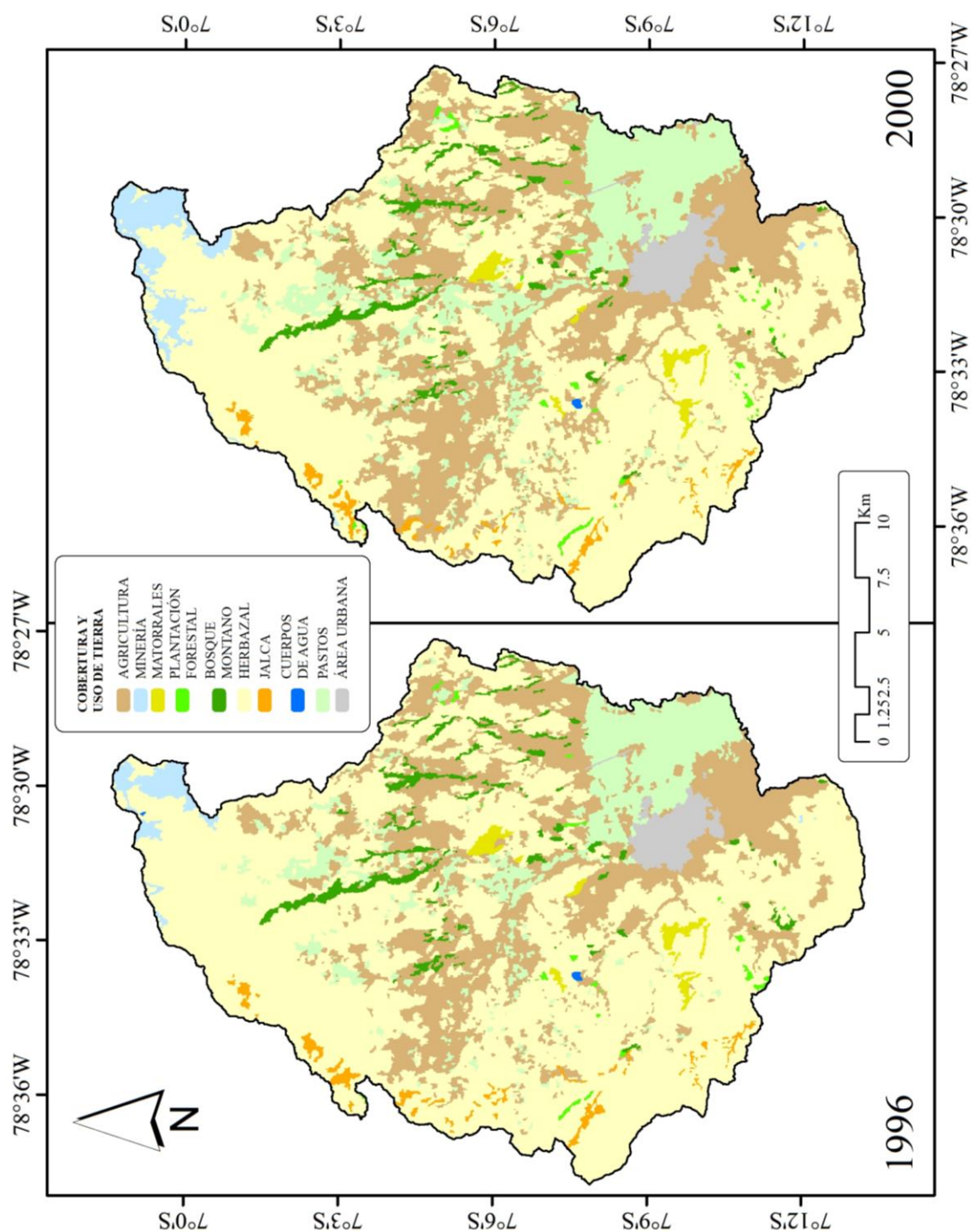


Figura 33 Mapas de cobertura y uso de tierra para los años 1996 y 2000.

Fuente: Elaboración propia.

En el 2007, las coberturas continuaron con la misma tendencia de reducción e incremento en su extensión. Resaltando el dominio de las áreas relacionadas con la actividad minera (3.06%, **Figura 34**) al norte de la cuenca (**Figura 35**).

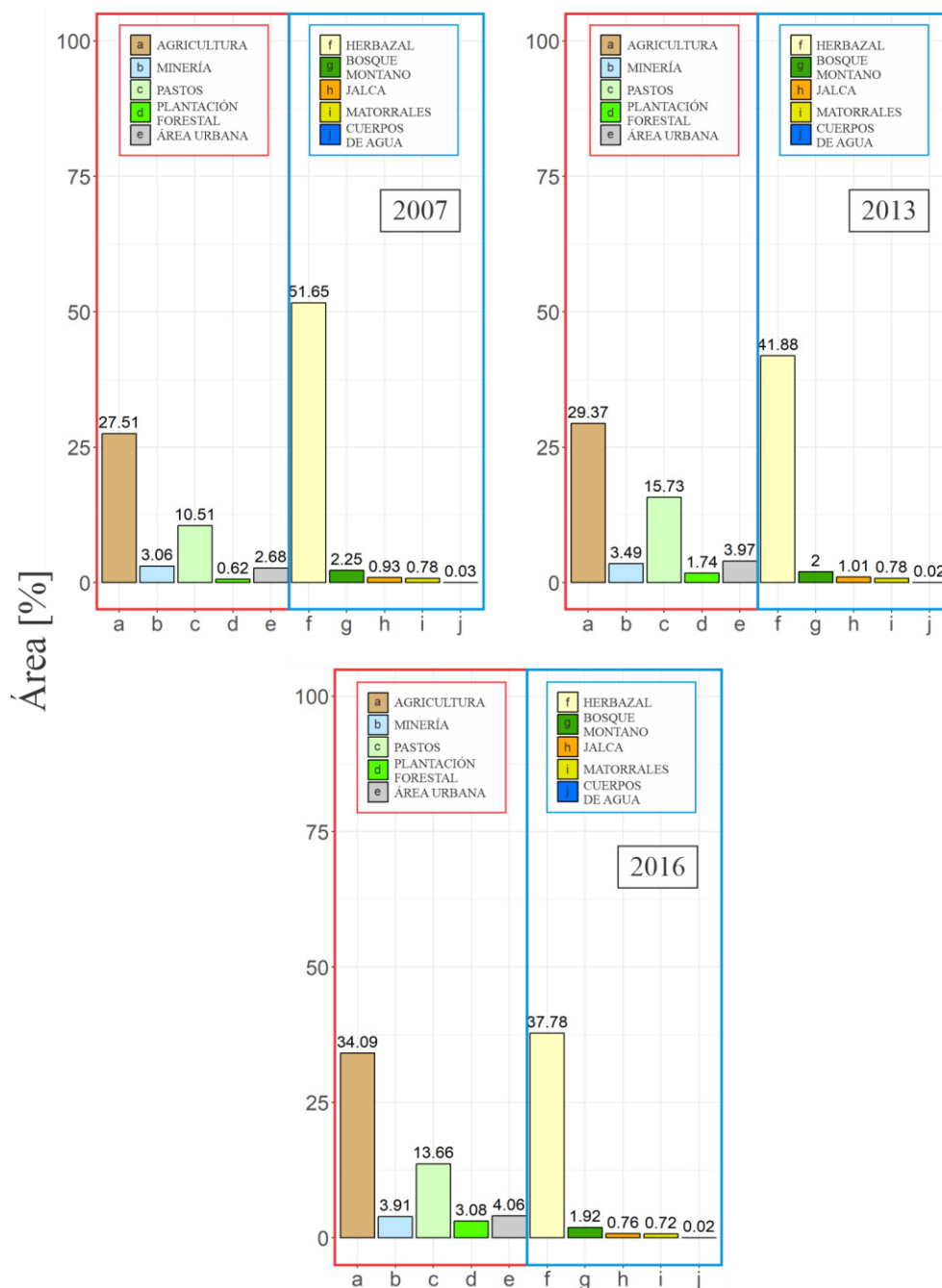


Figura 34 Gráficos de barras de cobertura y uso de tierra en la cuenca del río Mashcón, para los años 2007, 2013 y 2016; agrupados en coberturas no naturales (izquierda - rojo) y naturales (derecha - azul).

Fuente: Elaboración propia.

En el 2013, la extensión de la cobertura herbazal cayó por debajo del 50% de la superficie total (**Figura 34**). Por otro lado, la actividad minera continuó expandiendo sus límites (3.49%); pero fueron los cultivos de pastos (15.73%), las plantaciones forestales (1.74) y

las áreas urbanas (3.97%) (**Figura 34**) las protagonistas de la depredación de las áreas naturales (**Figura 35**). Por último, en el 2016, las coberturas agrícolas y herbazales culminan siendo equivalentes en extensión (34.09% y 37.78% respectivamente) (**Figura 34**); las plantaciones forestales, las áreas de extracción minera y las áreas urbanas consolidaron su asentamiento al este y norte del área de estudio (**Figura 36**). Sin embargo, los cultivos de pastos sufrieron un retroceso (13.66%, **Figura 36**).

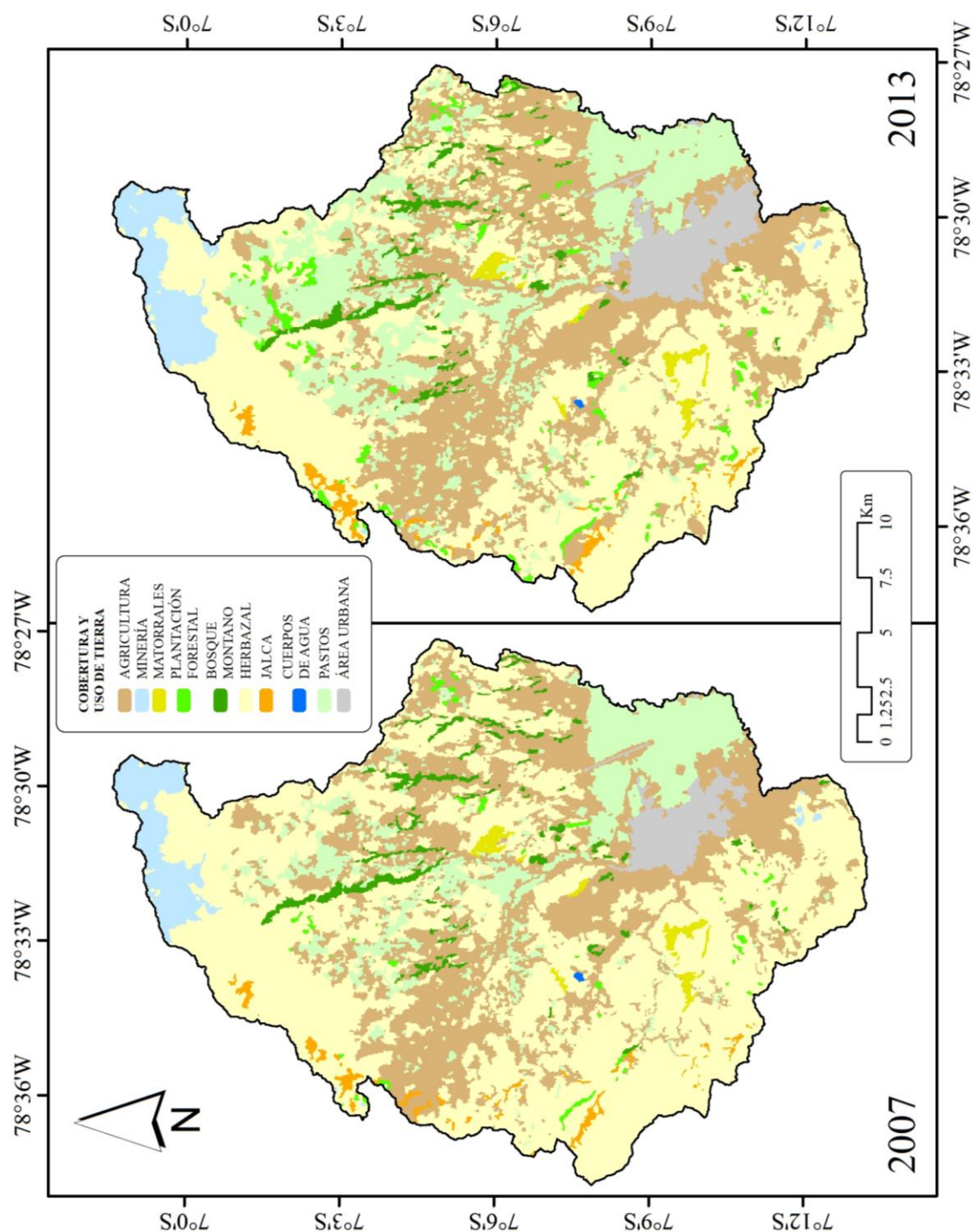


Figura 35 Mapas de cobertura y uso de tierra para los años 2007 y 2013.

Fuente: Elaboración propia.

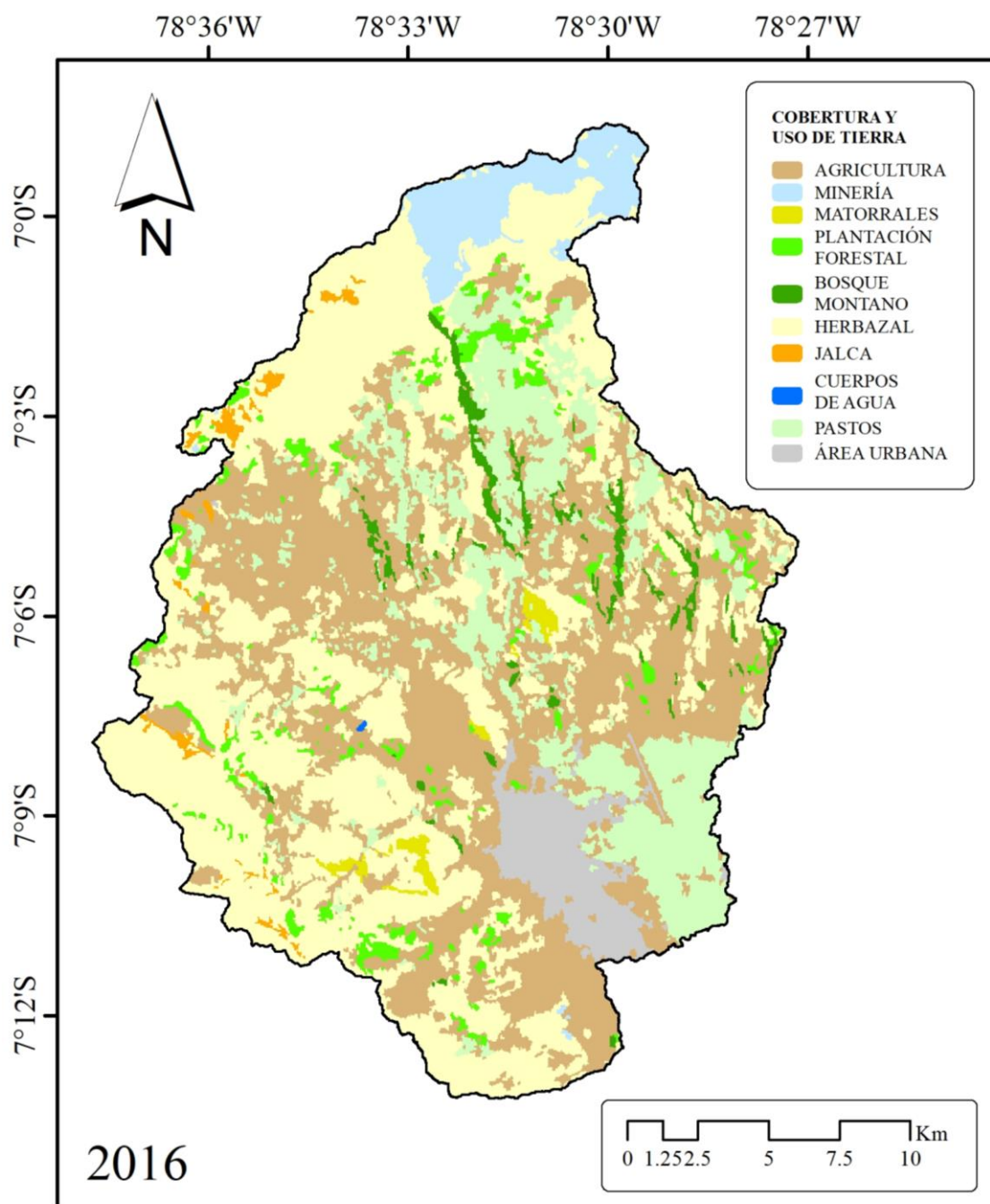


Figura 36] Mapas de cobertura y uso de tierra para el año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Cambios de cobertura y uso de tierra

Antes de dar comienzo a la descripción de los cambios, es necesario mencionar que los valores descritos únicamente en porcentaje (%), como el PCT, son referidos al área total de la cuenca del río Mashcón. Por otro lado, la TCA (%/año) estará referida al área inicial, por cobertura, del sub-período o período total (1987-2016) analizado según se mencione en los siguientes párrafos.

La descripción de los cambios de cobertura y uso de tierra (LUCC) (**Figura 37**), en los últimos treinta años, son el objetivo principal de este apartado. Cuantificando el reemplazo de las coberturas naturales por las no naturales en cada uno de los seis sub-períodos analizados entre 1987 y 2016.

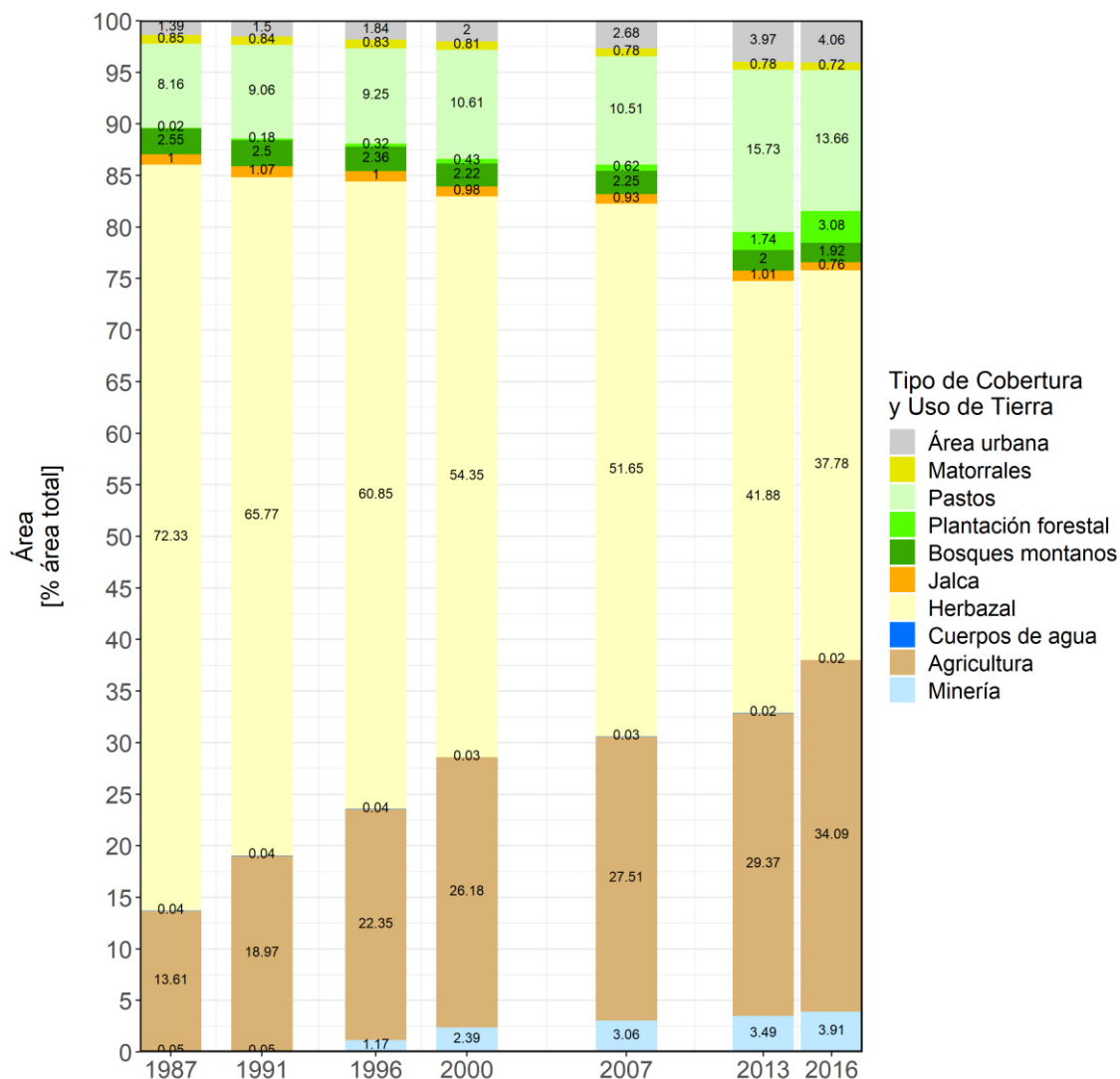


Figura 37 | Gráfico de barras de cambio de cobertura y uso de tierra entre 1987 y 2016.

Fuente: Elaboración propia.

A lo largo de todos los sub-períodos, los herbazales fueron las coberturas naturales con mayor extensión en la cuenca del río Mashcón, con una superficie inicial del 72.33% (22,549.6ha) en 1987 (**Figura 37**). A pesar de ello, los resultados muestran que hubo pérdidas considerables de -34.55% (-10,772.5ha, **Tabla 15**) a una TCA de $-2.24\%/año$ (**Tabla 16**) entre 1987 y 2016. Desde un panorama general, los herbazales fueron reemplazados principalmente por coberturas no naturales como la agricultura (23.4% o 7,298.1ha), los pastos (4.8% o 1,483.2 ha), la minería (3.7% o 1,145.8ha) y las plantaciones forestales (2.7% o 861ha) (**Tabla 15**).

Tabla 15] Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 1987 y 2016 (unidad de hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	1987										Total 2016
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	
2016											
Agricultura	2596.9	7298.1	2.5	264.0	43.7	383.0	34.4	2.3	1.8	1.3	10627.9
Herbazal	105.1	11525.7	0.7	39.5	74.1	7.7	24.1	0.0	0.0	0.3	11777.1
Minería	55.1	1145.8	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	1218.2
Bosques montanos	45.6	123.8	0.0	428.1	0.2	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	599.5
Jalca	0.0	77.1	0.0	0.0	160.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	237.2
Pastos	748.7	1483.2	0.0	38.3	31.6	1950.3	5.0	1.0	0.0	0.0	4258.0
Matorrales	1.0	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	197.0	0.0	0.0	0.0	224.6
Plantación forestal	66.0	861.0	0.0	22.5	2.8	1.4	3.5	2.3	0.0	0.0	959.4
Área urbana	625.4	8.2	0.0	1.7	0.7	199.0	0.0	0.0	432.2	0.0	1267.2
Cuerpos de agua	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	5.3
Total 1987	4243.8	22549.6	15.6	794.1	313.1	2543.0	264.0	5.6	434.0	11.7	31,174.3
Cambios de clase	1646.9	11023.9	3.2	365.9	153.1	592.7	67.0	3.3	1.8	6.5	
Diferencia de imagen	6384.2	-10772.5	1202.6	-194.6	-76.0	1715.0	-39.4	953.8	833.2	-6.4	

Tabla 16] Tabla de tasa de cambio anual (TCA) por tipo de cobertura y uso de tierra.**Fuente:** Elaboración propia.

Tasa de Cambio Anual (%/año)															
Cobertura y Uso de Tierra		1987-1991		1991-1996		1996-2000		2000-2007		2007-2013		2013-2016		1987-2016	
Áreas Naturales	Herbazal	-2.38		-1.56		-2.83		-0.73		-3.50		-3.44		-2.24	
	Bosques montanos	-0.44		-1.19		-1.56		0.19		-1.92		-1.34		-0.97	
	Matorrales	-0.08	-2.22	-0.34	-1.53	-0.69	-2.71	-0.48	-0.69	0.08	-3.28	-2.83	-3.46	-0.56	-2.15
	Cuerpos de agua	2.91		-2.32		-2.85		-1.84		-3.04		-12.17		-2.72	
	Jalca	1.64		-1.42		-0.55		-0.77		1.51		-9.60		-0.96	
Áreas No Naturales	Agricultura	8.30		3.28		3.95		0.71		1.09		4.97		3.17	
	Plantación forestal	58.35		10.89		7.67		5.08		17.23		19.06		17.75	
	Minería	1.29	6.20	62.06	3.20	17.92	4.38	3.48	0.91	2.19	3.37	3.81	2.66	15.04	3.20
	Área urbana	1.90		4.05		2.09		4.18		6.56		0.77		3.69	
	Pastos	2.61		0.42		3.44		-0.15		6.73		-4.71		1.78	

De las coberturas mencionadas, tenemos que la actividad agrícola es la que causó mayor impacto; siendo los sub-períodos 2000-2007 (233.8ha/año) (**Figura 38** y **Tabla 20**) y 2013-2016 (641.9ha/año) (**Figura 38** y **Tabla 22**) los de menor y mayor depredación de herbazales respectivamente. Por otro lado, los pastos causaron la menor y mayor sustitución en los sub-períodos 2013-2016 (23.4ha/año) (**Figura 38** y **Tabla 22**) y 2007-2013 (100.6ha/año) (**Figura 38** y **Tabla 21**). La actividad minera, por su parte, fue causante de la pérdida de 99.7ha/año de herbazales en el sub-período 1996-2000 (**Figura 38** y **Tabla 19**), siendo esta su máxima intervención en la década de los 90's, para luego continuar con una tendencia a la disminución en su impacto. Por último, las

plantaciones forestales logran su protagonismo, como cobertura depredadora de herbazales, en los sub-períodos 2007-2013 ($46ha/año$) (**Figura 38** y **Tabla 21**) y 2013-2016 ($75ha/año$) (**Figura 38** y **Tabla 22**).

Los sub-períodos con menor y mayor pérdida de herbazales fueron 2000-2007 ($PCT = -2.7\%$) y 2007-2013 ($PCT = -9.8\%$) (**Figura 39**) a TCA's de $-0.73\%/año$ y $-3.4\%/año$ respectivamente (**Tabla 16**), sin mostrar indicios de recuperación en extensión.

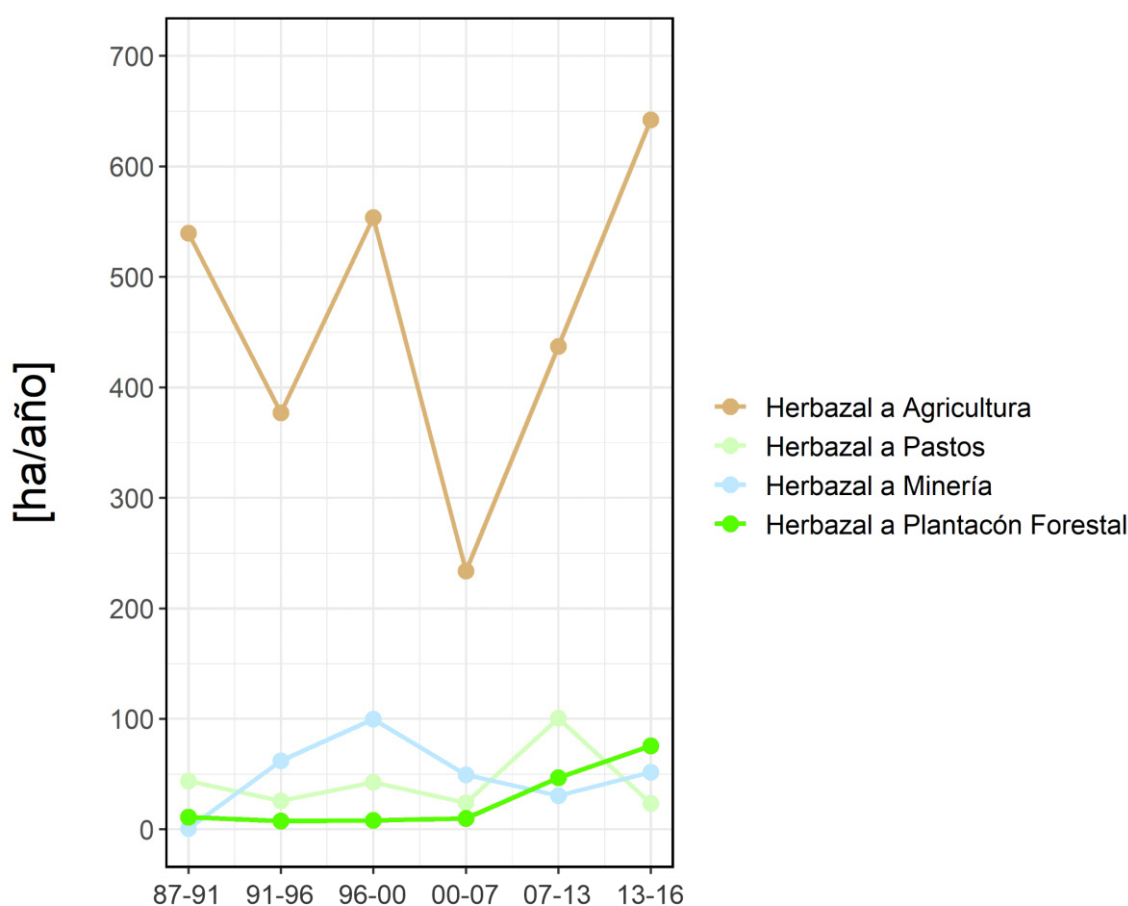


Figura 38| Cambio de cobertura herbazonal a otras actividades de actividad antrópica en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

Las coberturas Jalca sostuvieron la extensión promedio del 1% entre 1987 y 2013 (**Figura 37** y **39**). Sin embargo, entre 2013 y 2016, estas coberturas sufrieron pérdidas considerables de -0.24% (**Figura 39**) a una TCA de $-9.6\%/año$ (**Tabla 16**), con un supuesto reemplazo de Jalca por herbazales de $96.6 ha$ (0.3%) (**Tabla 22** y **Figura 33**). Por otro lado, lo que sí es un hecho, es la intervención de actividades antrópicas como la agricultura ($43.7ha$, 0.14%), cultivo de pastos ($31.6ha$, 0.1%) y las plantaciones forestales ($2.8ha$, 0.009%) en el ecosistema Jalca entre 1987 y 2016 (**Tabla 15**).

Los bosques montanos presentaron una pérdida paulatina en extensión (**Figura 37**) durante el período 1987-2016, con un total de 194.6ha (0.6%) intervenidas (**Tabla 15**) a una TCA de $-0.97\%/año$ (**Tabla 16**). Sin embargo, en el sub-período 2000-2007 presentó un comportamiento peculiar, ya que en estos años su extensión de mantuvo relativamente constante (2.2%) (**Figura 37** y **39**) con una TCA de $0.19\%/año$ (**Tabla 16**). El principal causante de este cambio, entre 1987 y 2016, fue la actividad agrícola con 264ha (0.8%) (**Tabla 15**) de bosques depredados.

Los matorrales, al igual que los bosques montanos, presentaron reducidas pérdidas en extensión en el período 1987-2016 (39.4ha o 0.12%) (**Tabla 15**), esto debido a que en los sub-períodos 1987-1991 y 2007-2013 su extensión se mantuvo relativamente constante (**Tabla 17** y **21**) con una TCA de $-0.08\%/año$ y $0.08\%/año$ respectivamente (**Tabla 16**). Esta cobertura fue reemplazada principalmente por áreas agrícolas en un total de 34.4ha entre 1987 y 2016 (**Tabla 15**).

Los cuerpos de agua, en 1987, estuvieron representados por lagunas ubicadas al extremo norte de la cuenca y al noroeste de la ciudad de Cajamarca, con un total del 0.04% (11.7ha) (**Figura 37**). Su extensión sostuvo una constante del 0.04% (**Figura 37**) hasta 1996. Posteriormente, estos fueron reemplazados principalmente por áreas relacionadas con la actividad de extracción minera (6.4ha o 0.023%) (**Tabla 15**). Ya en el 2016, esta cobertura solo es representado por la laguna Chamis con el 0.017% (5.3ha) (**Figura 37**).

Tabla 17 | Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 1987 y 1991 (unidad de hectáreas).

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	1987										Total 1991
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantaciones forestales	Área urbana	Cuerpos de agua	
1991											
Agricultura	3389.0	2157.8	0.0	73.5	3.4	265.5	5.0	0.4	18.9	0.2	5913.7
Herbazal	360.1	19973.3	2.4	52.2	64.9	33.0	17.6	0.0	0.0	0.7	20504.2
Minería	0.0	3.2	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.4
Bosques montanos	41.7	84.3	0.0	651.0	0.2	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	780.4
Jalca	0.6	89.6	0.0	0.0	244.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	334.4
Pastos	392.5	174.7	0.0	15.8	0.5	2236.8	0.2	0.0	2.6	0.0	2823.1
Matorrales	1.4	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	241.2	0.0	0.0	0.0	263.2
Plantación forestal	6.8	43.9	0.0	1.5	0.0	0.1	0.0	5.2	0.0	0.0	57.6
Área urbana	51.5	0.1	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	412.5	0.0	468.3
Cuerpos de agua	0.2	2.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	10.8	13.1
Total 1987	4243.8	22549.6	15.6	794.1	313.1	2543.0	264.0	5.6	434.0	11.7	31174.3
Cambios de clase	854.7	2576.3	2.4	143.1	69.0	306.2	22.8	0.4	21.5	0.9	0.0
Diferencia de imagen	1670.0	-2045.4	0.8	-13.7	21.2	280.2	-0.8	52.0	34.3	1.4	0.0

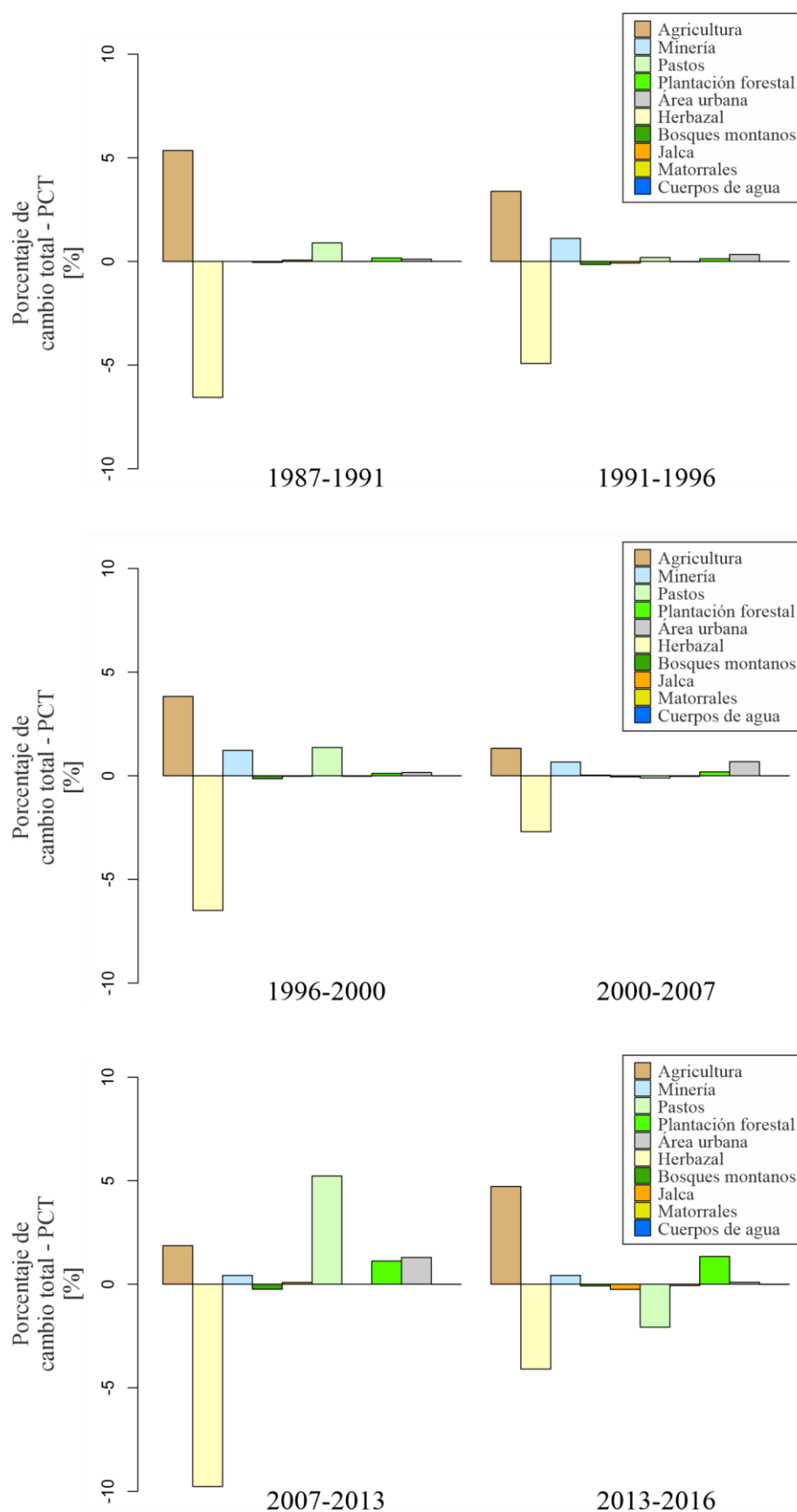


Figura 39] Porcentaje de cambio total (PCT) para cada sub – período entre 1987 y 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18| Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 1991 y 1996 (unidad de hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	1991										Total 1996
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantaciones forestales	Área urbana	Cuerpos de agua	
1996											
Agricultura	4554.3	1884.3	0.0	115.7	9.4	381.2	4.3	7.0	12.2	0.5	6968.9
Herbazal	731.4	18003.1	2.0	45.0	90.7	73.9	19.1	3.0	0.0	1.0	18969.1
Minería	37.4	309.9	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	364.0
Bosques montanos	60.3	47.5	0.0	615.6	0.1	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	735.2
Jalca	2.9	74.1	0.0	0.1	233.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	311.1
Pastos	419.2	128.9	0.0	3.7	0.0	2329.9	0.0	0.0	1.4	0.0	2883.2
Matorrales	3.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	239.8	0.0	0.0	0.0	258.8
Plantación forestal	12.5	38.1	0.0	0.3	0.7	0.0	0.0	47.6	0.0	0.0	99.2
Área urbana	92.8	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	0.0	0.0	454.6	0.0	573.2
Cuerpos de agua	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.4	11.7
Total 1991	5913.7	20504.2	16.4	780.4	334.4	2823.1	263.2	57.6	468.3	13.1	31174.3
Cambios de clase	1359.5	2501.1	2.0	164.8	100.9	493.2	23.4	10.0	13.7	3.8	
Diferencia de imagen	1055.2	-1535.0	347.6	-45.2	-23.2	60.0	-4.4	41.6	104.9	-1.4	

Tabla 19| Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 1996 y 2000 (unidad de hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	1996										Total 2000
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	
2000											
Agricultura	5472.1	2215.0	0.0	91.3	24.1	318.2	8.4	6.8	25.7	0.4	8161.8
Herbazal	700.3	16021.2	16.7	57.4	61.2	49.5	17.7	16.5	0.0	1.7	16942.1
Minería	0.0	399.0	347.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	746.6
Bosques montanos	76.1	36.6	0.0	576.1	0.1	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	690.8
Jalca	3.2	77.4	0.0	0.1	223.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	304.4
Pastos	620.9	169.7	0.0	10.1	2.1	2499.8	0.4	0.4	5.4	0.0	3308.6
Matorrales	2.2	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	232.3	0.0	0.0	0.0	251.6
Plantación forestal	26.0	32.8	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	75.5	0.0	0.0	134.6
Área urbana	67.4	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7	0.0	0.0	542.2	0.0	623.3
Cuerpos de agua	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	10.4
Total 1996	6968.9	18969.1	364.0	735.2	311.1	2883.2	258.8	99.2	573.2	11.7	31174.3
Cambios de clase	1496.8	2948.0	16.7	159.1	87.6	383.4	26.5	23.7	31.1	2.3	
Diferencia de imagen	1193.0	-2027.0	382.6	-44.4	-6.8	425.4	-7.1	35.5	50.0	-1.3	

Tabla 20| Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 2000 y 2007 (unidad en hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	2000										Total 2007
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	
2007											
Agricultura	6160.2	1637.1	0.0	94.6	14.9	642.9	4.0	12.7	8.6	0.3	8575.2
Herbazal	1126.2	14602.2	141.8	39.6	82.4	56.7	22.0	29.6	0.0	1.1	16101.5
Minería	3.6	345.0	604.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	953.6
Bosques montanos	91.0	51.8	0.0	548.0	0.0	8.2	0.0	1.3	0.0	0.0	700.2
Jalca	21.2	58.0	0.2	0.0	204.2	4.8	0.0	0.2	0.0	0.0	288.5
Pastos	530.0	167.0	0.0	7.1	1.9	2565.1	1.7	1.2	1.2	0.0	3275.1
Matorrales	6.0	13.1	0.0	0.0	0.0	0.1	224.0	0.0	0.0	0.0	243.3
Plantación forestal	32.3	68.0	0.0	1.1	0.6	0.8	0.0	89.7	0.0	0.0	192.6
Área urbana	191.2	0.0	0.0	0.5	0.0	30.1	0.0	0.0	613.5	0.0	835.2
Cuerpos de agua	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	9.2
Total 2000	8161.8	16942.1	746.6	690.8	304.4	3308.6	251.6	134.6	623.3	10.4	31174.3
Cambios de clase	2001.6	2339.9	141.9	142.8	100.2	743.5	27.6	44.9	9.7	1.4	
Diferencia de imagen	413.4	-840.7	207.0	9.4	-15.8	-33.5	-8.4	58.0	212.0	-1.3	

Tabla 21| Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 2007 y 2013 (unidad en hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	2007										Total 2013
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	
2013											
Agricultura	5908.0	2621.3	2.3	142.3	31.5	408.0	5.6	19.4	17.3	1.0	9156.6
Herbazal	635.9	12233.2	48.3	35.5	33.4	25.6	12.5	30.0	0.0	0.6	13054.9
Minería	0.5	182.9	902.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1086.6
Bosques montanos	79.7	47.1	0.0	491.9	0.0	5.5	0.0	0.1	0.0	0.0	624.2
Jalca	6.2	110.5	0.0	0.1	198.6	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	315.8
Pastos	1473.8	604.1	0.0	16.9	24.2	2780.6	1.4	2.3	1.2	0.0	4904.6
Matorrales	2.3	19.7	0.0	0.0	0.0	0.3	222.3	0.0	0.0	0.0	244.5
Plantación forestal	103.8	279.6	0.0	13.3	0.8	2.4	1.4	140.1	0.0	0.0	541.5
Área urbana	365.2	3.1	0.0	0.3	0.0	52.7	0.0	0.0	816.8	0.0	1238.0
Cuerpos de agua	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	7.7
Total 2007	8575.2	16101.5	953.6	700.2	288.5	3275.1	243.3	192.6	835.2	9.2	31174.3
Cambios de clase	2667.2	3868.3	50.7	208.4	89.9	494.5	21.0	52.5	18.5	1.6	
Diferencia de imagen	581.4	-3046.6	133.0	-76.1	27.3	1629.5	1.3	348.9	402.8	-1.5	

Tabla 22 Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra entre los años 2013 y 2016 (unidad en hectáreas).**Fuente:** Elaboración propia.

Cobertura y Uso de Tierra	2013										Total 2016
	Agricultura	Herbazal	Minería	Bosques montanos	Jalca	Pastos	Matorrales	Plantación forestal	Área urbana	Cuerpos de agua	
2016											
Agricultura	7260.7	1925.9	4.9	105.5	17.2	1152.2	24.9	58.6	76.1	2.0	10627.9
Herbazal	843.2	10611.1	18.9	13.8	96.6	149.2	10.4	32.9	0.7	0.4	11777.1
Minería	0.0	155.3	1062.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1218.2
Bosques montanos	89.6	22.4	0.0	477.5	0.1	6.3	0.0	3.5	0.0	0.0	599.5
Jalca	7.6	28.0	0.0	0.0	198.1	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	237.2
Pastos	591.2	70.4	0.0	18.0	3.3	3564.5	1.3	4.3	5.0	0.0	4258.0
Matorrales	2.3	14.2	0.0	0.0	0.0	1.7	205.9	0.4	0.0	0.0	224.6
Plantación forestal	259.1	226.4	0.0	9.4	0.5	20.3	2.1	441.7	0.0	0.0	959.4
Área urbana	102.9	1.3	0.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	1156.2	0.0	1267.2
Cuerpos de agua	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	5.3
Total 2013	9156.6	13054.9	1086.6	624.2	315.8	4904.6	244.5	541.5	1238.0	7.7	31174.3
Cambios de clase	1895.9	2443.8	23.8	146.6	117.7	1340.0	38.6	99.8	81.8	2.3	
Diferencia de imagen	1471.3	-1277.7	131.6	-24.7	-78.7	-646.6	-20.0	417.9	29.2	-2.3	

Hasta el párrafo anterior se describieron los cambios de las coberturas naturales en la cuenca. A continuación, se describen los cambios de las coberturas relacionadas con la actividad antrópica como la agricultura, cultivo de pastos, plantaciones forestales, actividad minera y expansión urbana.

La actividad agrícola es una práctica antigua, localizada en altitudes medias y valle de la cuenca del río Mashcón, abastece el autoconsumo y, hasta cierto punto, la salida de productos a regiones vecinas. Entre 1987 y 2016, esta cobertura se expandió desde un 13.61% (4,243.8ha) hasta 34.09% (10,627.9ha) (**Figura 37**) a una TCA de +3.17%/año (**Tabla 16**). Las principales coberturas afectadas fueron los herbazales (7,298.1ha), los pastos (383ha) y los bosques montanos (264ha) (**Tabla 15**). De las coberturas mencionadas, tenemos que los herbazales fueron los que sufrieron mayor impacto; siendo los sub-períodos 2000-2007 (233.8ha/año) (**Figura 40** y **Tabla 20**) y 2013-2016 (641.9ha/año) (**Figura 40** y **Tabla 22**) los de menor y mayor depredación respectivamente. Por otro lado, los pastos se vieron afectados por debajo de las 100ha/año durante los cinco primeros sub-períodos (**Figura 40**); sin embargo, entre 2013 y 2016 se mostró un incremento drástico en la mudanza hacia la agricultura (384ha/año) (**Figura 40** y **Tabla 22**). Por último, los bosques montanos mudaron constantemente a áreas agrícolas a un ritmo por debajo del 50ha/año, alcanzando un pico en el sub-intervalo 2013-2016 (46ha/año) (**Figura 40** y **Tabla 22**).

Durante el proceso de expansión de las áreas agrícolas, los sub-períodos con mayor y menor TCA y PCT fueron 1987-1991 (+8.3%/año, +5.35%) y 2000-2007 (+0.71%/año, +1.32%) (**Tabla 16** y **Figura 39**) respectivamente. Sin embargo, a pesar de dicho crecimiento, es necesario mencionar que hubo pérdidas de territorio debido a su reemplazo por coberturas como los pastos (748.7ha) y el crecimiento de áreas urbanas (625.4ha) (**Tabla 15**).

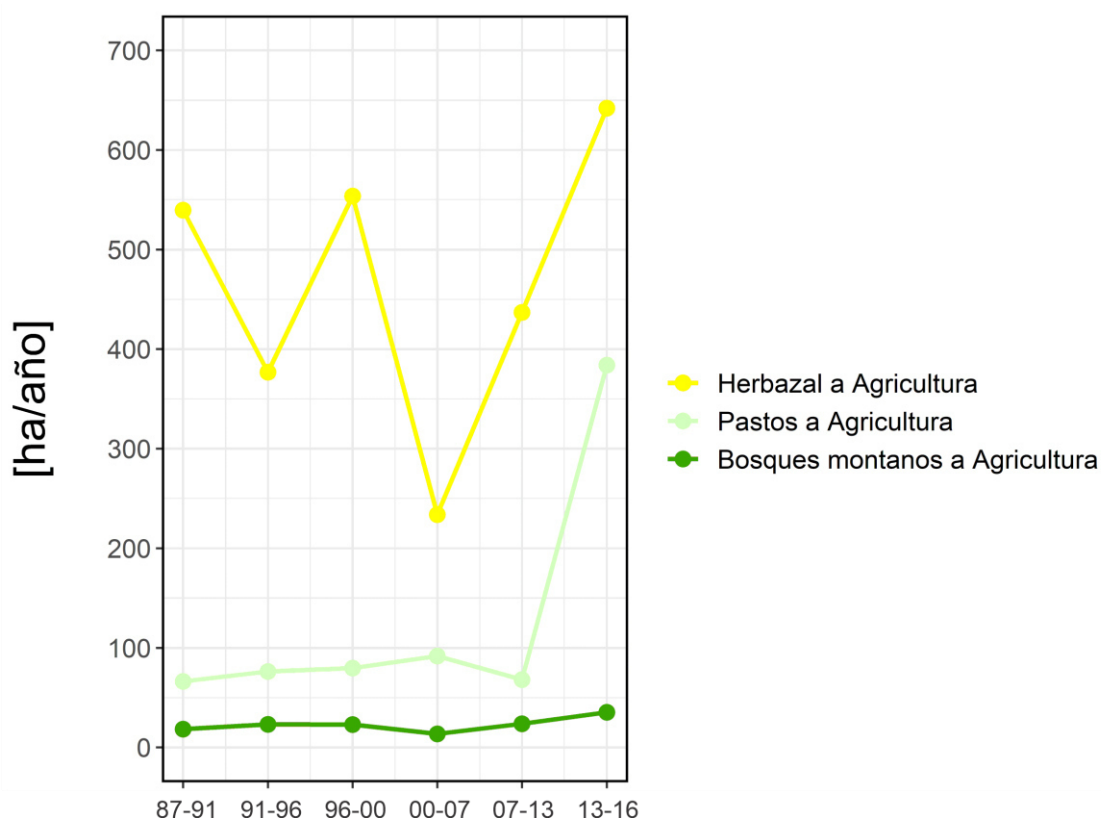


Figura 40 Cambio de cobertura herbazal, pastos y bosques montanos a áreas agrícolas en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

El cultivo de pastos es la segunda actividad que generó mayor impacto, en áreas de cobertura natural, entre los años 1987 (8.16%) y 2016 (13.66%) (**Figura 37**), con un crecimiento neto de 1,715ha (**Tabla 15**) a una TCA de +1.78%/año (**Tabla 16**). Las principales coberturas afectadas fueron las áreas agrícolas (748.7ha) y herbazales (1,483.2ha) (**Tabla 15**). Entre estas, la agricultura es la que más se vio afectada, siendo los sub-períodos 2000-2007 (75.7ha/año) (**Figura 41** y **Tabla 20**) y 2007-2013 (245.6ha/año) (**Figura 41** y **Tabla 21**) los de menor y mayor pérdida respectivamente. Asimismo, los herbazales se vieron afectados por debajo de 50ha/año a excepción del sub-período 2007-2013, que es donde se alcanzó el 100.6ha/año (**Figura 41**). Por lo

tanto, tenemos que durante el sub-período 2007-2013 se presentó la mayor expansión de pastos cultivados ($PCT = +5.2\%$, $TCA = +6.73\%/año$) (**Tablas 16**), en el cual la mudanza de áreas agrícolas a pastos fue más de tres veces que la extensión de pastos que cambiaron a áreas agrícolas (**Tabla 21**).

En término generales, se describe a una cobertura en expansión; sin embargo, en el sub-período 2000-2007 este crecimiento se estancó con un PCT de -0.1% (**Figura 39**) a una TCA de $-0.15\%/año$ (**Tablas 16**); además, es importante resaltar que el sub-período 2013-2016 es la único considerado como pérdida en extensión a una TCA de $-4.71\%/año$ (**Tabla 16**) debido principalmente a que la mudanza de pastos a áreas agrícolas ($1,152.2ha$) es de aproximadamente dos veces la extensión áreas agrícolas que cambiaron a pastos ($591.2ha$) (**Tabla 22**).

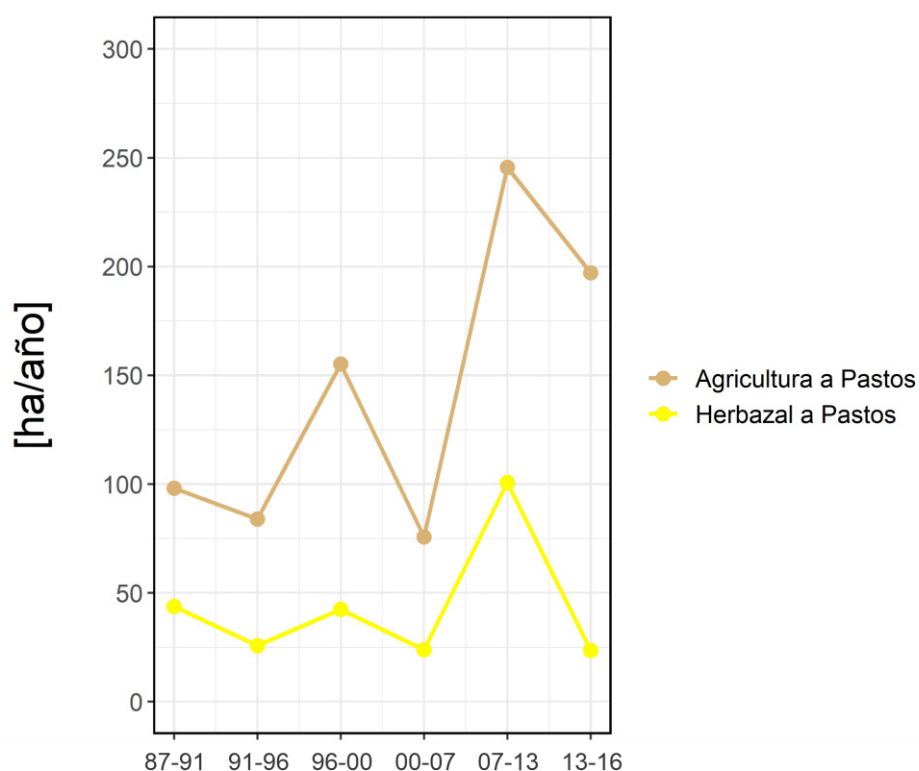


Figura 41 Cambio de cobertura agrícola y herbazales a pastos en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

En los 80's, la actividad minera aún no era considerada como la principal cobertura asentada al norte de la cabecera de cuenca del río Mashcón. Entre 1987 y 2016, esta se expandió desde un 0.05% ($15.6ha$) hasta 3.91% ($1,218.2ha$) (**Figura 37**) a una TCA de $+15.04\%/año$ (**Tabla 16**). La principal cobertura natural afectada por su crecimiento fue el herbazal ($1,145.8ha$) (**Tabla 15**), siendo los sub-períodos 1996-2000 ($99.75ha/año$)

(Figura 42 y Tabla 19) y 2007-2013 (30.48ha/año) (Figura 42 y Tabla 21) los de mayor y menor depredación respectivamente. Si bien estos cambios no representan gran magnitud a diferencia de otras coberturas como la agricultura y el cultivo de pastos (Figura 37), lo que lo hace importante es que su expansión se concentra en una sola región del área de estudio. Por lo tanto, se describe a una cobertura que en los últimos treinta años siempre vio incrementada su extensión en ritmos distintos, especialmente en los 90's, con TCA's de +62.06%/año y +17.92%/año durante 1991-1996 y 1996-2000 (Tabla 16) respectivamente; sin embargo, en ambos sub-períodos, los PCT's fueron similares con +1.12% (347.6ha) en el primero (Figura 34 y Tabla 18) y +1.23% (382.6ha) (Figura 34 y Tabla 19) en el segundo, debido a la diferencia en el estado inicial de su extensión en cada sub-período analizado.

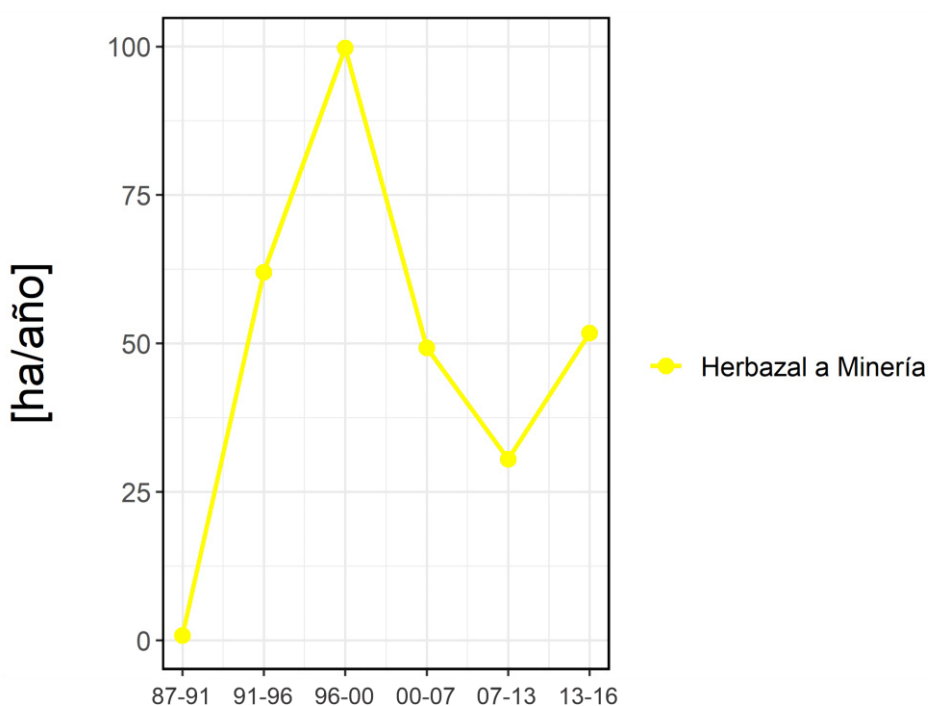


Figura 42] Cambio de cobertura herbazal a áreas de extracción minera en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

El área urbana siempre se estableció en el valle de la cuenca. Entre 1987 y 2016, la expansión de esta cobertura se dio desde un 1.39% (434ha) hasta 4.06% (1,267.2ha) (Figura 37) a una TCA de +3.69%/año (Tabla 15). Las principales coberturas afectadas por su crecimiento fueron las áreas agrícolas (625.4ha) y los cultivos de pastos (199ha) (Tabla 15). De estas, la agricultura fue la que sufrió mayor reemplazo, con un ritmo creciente y paulatino desde 12.8ha/año hasta 60.8ha/año en los sub-períodos 1987-1991 (TCA = +1.9%/año) y 2007-2013 (TCA = +6.56%/año) (Figura 43 y Tablas 16)

respectivamente. Por otro lado, los pastos fueron reemplazadas a un ritmo menor a los $7.5ha/año$, con excepción del sub-período 2007-2013 donde se alcanzó $8.7ha/año$ (**Figura 43**). Por último, en los últimos tres años, durante el sub-período 2013-2016, se presentó la menor TCA positiva ($+0.77\%/año$), con tan solo $29.2ha$ de crecimiento (**Tabla 21**).

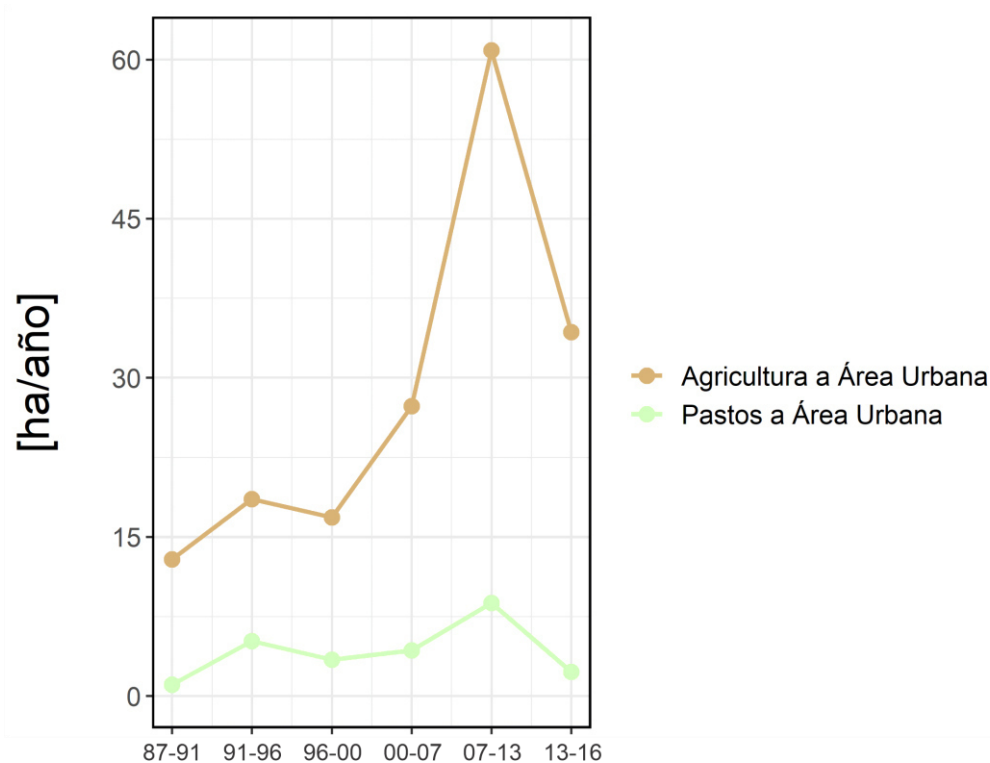


Figura 43 Cambio de cobertura agrícola y pastos a áreas urbanas en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

Las plantaciones forestales, al igual que la expansión de áreas urbanas y actividad minera, no son significativas del área total de la cuenca (**Figura 39**) pero, a diferencia de estas, dichas plantaciones no se concentran en una sola región, por el contrario, están distribuidas a lo largo de toda el área de estudio. Entre 1987 y 2016, esta cobertura se expandió desde un 0.02% ($5.6ha$) hasta 3.07% ($959.4ha$) (**Figura 37**) a una TCA de $+17.75\%/año$ (**Tabla 16**). Las principales coberturas afectadas por su crecimiento fueron los herbazales ($861ha$) y la agricultura ($66ha$) (**Tabla 15**), ambos siguieron un ritmo de reemplazo continuo y en aumento durante el período 1987 – 2016 hasta llegar a $75.4ha/año$ y $86.3ha/año$ en el sub-período 2013-2016 (**Figura 44**) respectivamente. Los mayores PCT's identificados fueron durante los dos últimos sub-períodos, con $+1.12\%$ (2007-2013) y 1.34% (2013-2016) (**Figura 39**) con TCA de $+17.23\%/año$ y $+19.06\%/año$ respectivamente (**Tabla 16**).

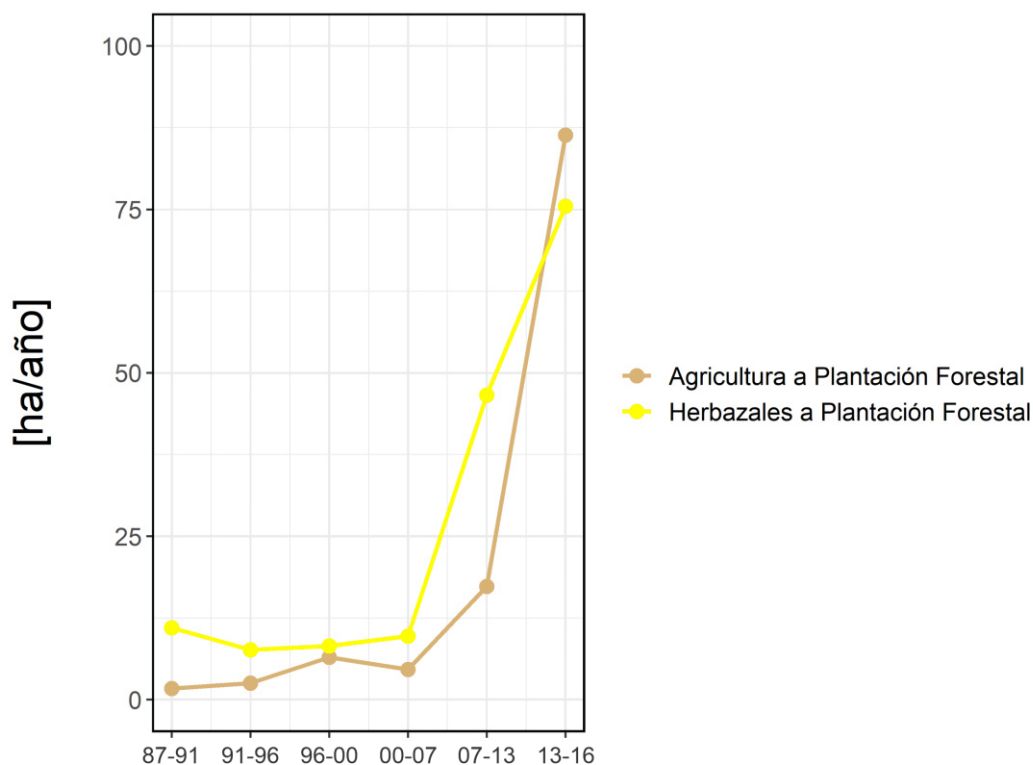


Figura 44| Cambio de cobertura agrícola y herbazales a plantaciones forestales en unidad de hectáreas por año, para cada sub-período.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Cambios y patrones espaciales a lo largo de la gradiente de elevación

El objetivo principal de este apartado es describir la distribución de las CUT a lo largo de la gradiente de elevación (2600 - 4200m) para cada año del período 1987-2016 (**Tabla 24-25**). Es por tal motivo que el área de estudio fue subdividida altitudinalmente en intervalos de 200 metros (**Figura 45**); asimismo, se calculó la extensión para cada uno de ellos para resaltar su significancia respecto del área total de la cuenca (**Tabla 23**). Por último, los principales cambios y posibles tendencias de expansión – reducción, por CUT e intervalos de elevación, fueron cuantificados para cada uno de los siete sub-períodos (**Anexo 7**).

Tabla 23| Área por intervalos de elevación.

Fuente: Elaboración propia.

Intervalos de elevación	Área [ha]	Área [%]
2600 – 2800	3876.52	12.43
2800 – 3000	3561.55	11.42
3000 – 3200	4828.97	15.49
3200 – 3400	5488.96	17.61
3400 – 3600	6809.02	21.84
3600 – 3800	4778.79	15.33
3800 – 4200	1830.48	5.87

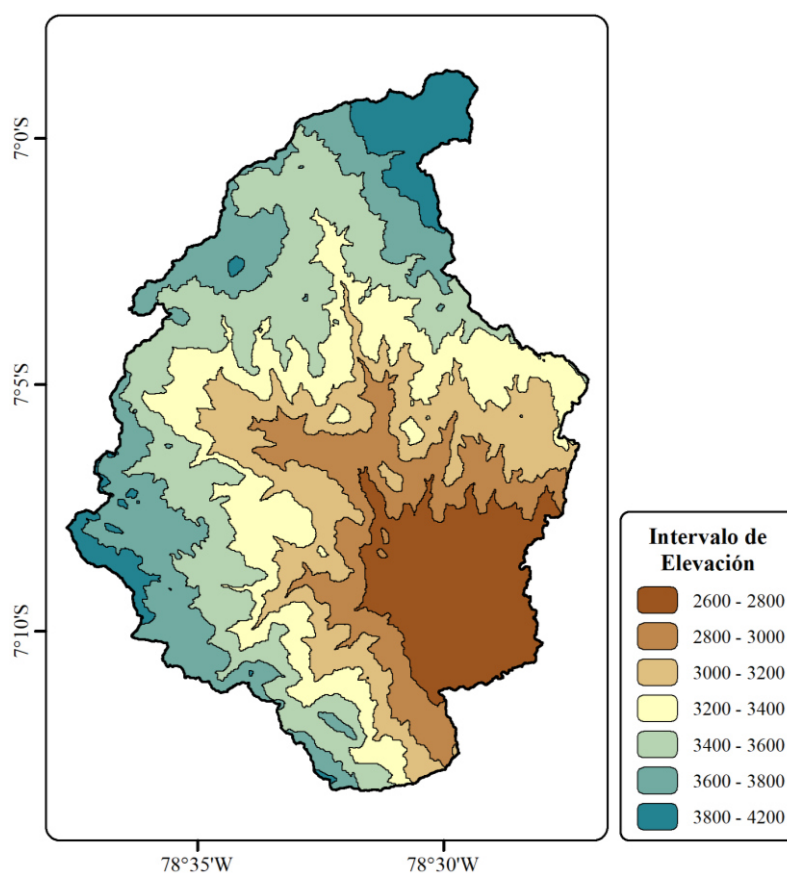


Figura 45| Cuenca Mashcón subdividida por intervalos de elevación.

Fuente: Elaboración propia.

La mayor extensión de herbazales se encuentra entre los 3000 y 3800m, en otros rangos altitudinales su extensión es menor a las 2,000ha (6.42%) (**Figura 46 y Tabla 24**). Entre 1987 y 2013, el intervalo de los 3400 - 3600m albergó la máxima cantidad vegetación herbácea; por otro lado, ya en el 2016, esta concentración mudó al intervalo de los 3600 -3800m (**Figura 46 y Tabla 24**). Este cambio fue el resultado del impacto acumulado de la actividad agrícola (5788.5ha, 3000-3600m), el cultivo de pastos (1,070.8ha, 3200-3600m), la actividad minera (600ha, 3800-4200m) y las plantaciones forestales (610.7ha, 3400-3800m) (**Anexo 7**), entre 1987 y 2016. En términos generales, la tendencia, en todos los rangos de elevación, es a la reducción de esta cobertura.

Los bosques montanos están localizados principalmente entre los 3000 y 3400m, en elevaciones inferiores y superiores a esta su extensión es menor a las 200ha (0.64%), siendo imperceptibles por sobre los 3600m (**Figura 46 y Tabla 24**). Entre 1987 y 2013, los bosques montanos se concentraron en el intervalo de los 3200-3400m; pero fue en el 2016 cuando dicho comportamiento cambió y fue el intervalo de los 3000-3200m el que concentró esta cobertura (**Figura 46 y Tabla 24**). La reducida pérdida de estos bosques naturales fue producto del impacto acumulado de la actividad agrícola (82ha, 2800-

3000m), el cultivo de pastos (28.7ha, 3200-3400m) y las plantaciones forestales (15.1ha, 2800-3000m) (**Anexo 7**).

La Jalca se encuentra principalmente entre los 3400 y 3800m. No se detectan cambios considerables. La variabilidad de su extensión es debido a su confusión espectral con los herbazales, principalmente entre los 3600 y 3800m (55.2ha, **Anexo 7**), ya que es improbable la mudanza entre dichas coberturas.

Los matorrales se extienden entre los 3000 y 3400m. Por otro lado, es posible encontrar este tipo de coberturas tanto por debajo como por sobre estas elevaciones, pero con extensiones inferiores a las 50ha y 15ha respectivamente (**Figura 46** y **Tabla 24**). La reducción de su superficie es debido principalmente a la actividad agrícola (34.4ha, 2800 y 3400m) (**Anexo 7**).

Los cuerpos de agua se concentraron (1987 al 1996) en los intervalos 3200-3400m y 3800-4200m (**Figura 46** y **Tabla 24**), representando el 0.04% (~12ha). Sin embargo, a inicios de los 90's con impacto de la actividad minera entre los 3800-4200m, esta cobertura fue disminuyendo su extensión. Es así, que desde el año 2000, se registra como único cuerpo de agua a la laguna de Chamis (0.02%, 3200 - 3400m) (**Tabla 24**)

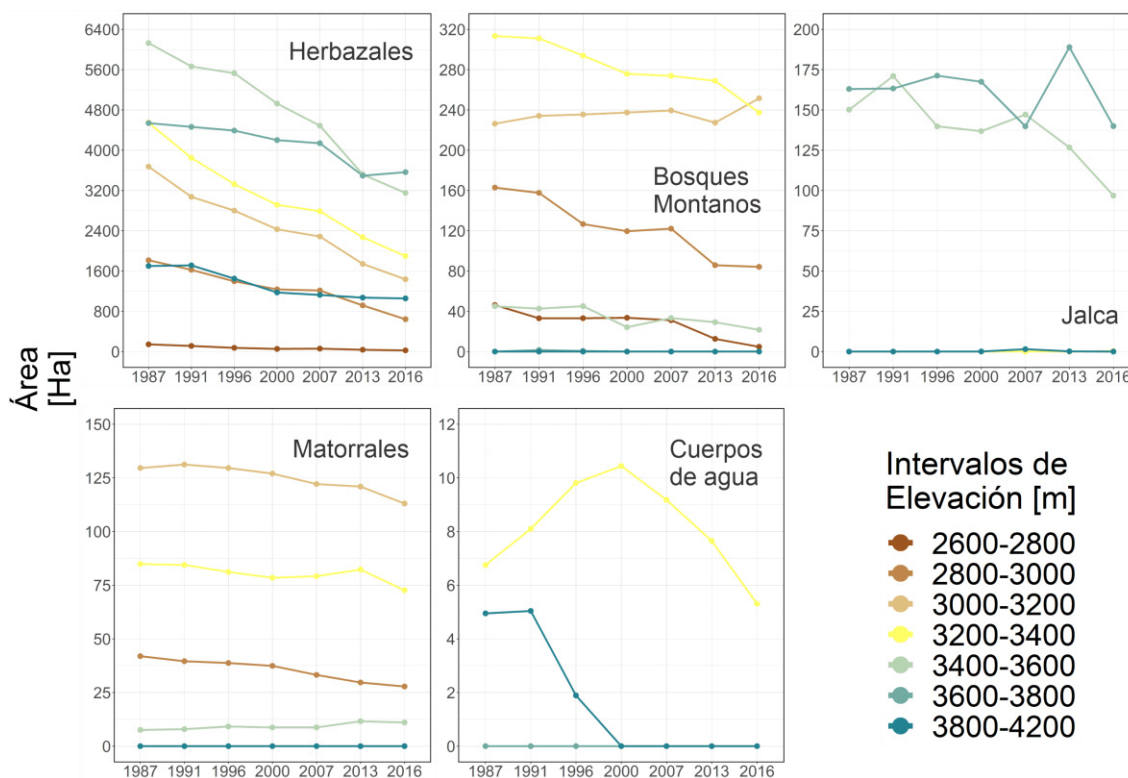


Figura 46 Cambio de cobertura y uso de tierra, para coberturas naturales, por intervalos de elevación entre los años 1987 y 2016.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24| Extensión de coberturas naturales por intervalos de elevación.**Fuente:** Elaboración propia.

CUT	Año	Intervalos de elevación (metros)							Total [ha]	Total [%]
		2600-2800	2800-3000	3000-3200	3200-3400	3400-3600	3600-3800	3800-4200		
		[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]		
Herbazal	1987	141.39	1809.99	3672.90	4544.01	6126.84	4547.70	1706.76	22549.59	72.33
	1991	111.69	1620.63	3074.04	3844.53	5660.91	4472.91	1719.45	20504.16	65.77
	1996	74.07	1392.66	2799.27	3324.69	5523.66	4398.48	1456.29	18969.12	60.85
	2000	53.46	1234.80	2428.83	2913.84	4922.55	4210.20	1178.46	16942.14	54.35
	2007	58.14	1211.85	2286.54	2786.31	4481.82	4147.20	1129.59	16101.45	51.65
	2013	35.82	916.38	1740.42	2270.43	3513.87	3501.81	1076.13	13054.86	41.88
	2016	23.49	642.33	1436.04	1898.91	3146.13	3570.39	1059.84	11777.13	37.78
Bosques montanos	1987	46.08	160.92	227.25	314.37	45.45	0.00	0.00	794.07	2.55
	1991	33.03	155.70	234.99	311.94	43.02	1.71	0.00	780.39	2.50
	1996	33.30	124.56	236.16	294.84	45.72	0.63	0.00	735.21	2.36
	2000	33.57	117.72	237.96	277.02	24.57	0.00	0.00	690.84	2.22
	2007	31.14	120.51	240.03	274.50	33.93	0.09	0.00	700.20	2.25
	2013	12.69	84.42	227.61	269.37	30.06	0.00	0.00	624.15	2.00
	2016	4.77	83.34	250.92	238.23	22.23	0.00	0.00	599.49	1.92
Jalca	1987	0.00	0.00	0.00	0.00	148.86	164.25	0.00	313.11	1.00
	1991	0.00	0.00	0.00	0.00	170.10	164.25	0.00	334.35	1.07
	1996	0.00	0.00	0.00	0.00	139.14	171.99	0.00	311.13	1.00
	2000	0.00	0.00	0.00	0.00	136.44	167.85	0.09	304.38	0.98
	2007	0.00	0.00	0.00	0.00	146.52	140.49	1.53	288.54	0.93
	2013	0.00	0.00	0.00	0.00	125.37	190.26	0.18	315.81	1.01
	2016	0.00	0.00	0.00	0.36	96.03	140.76	0.00	237.15	0.76
Matorrales	1987	0.00	41.58	130.32	84.60	7.47	0.00	0.00	263.97	0.85
	1991	0.00	39.24	131.94	84.33	7.65	0.00	0.00	263.16	0.84
	1996	0.00	38.52	130.14	81.09	9.00	0.00	0.00	258.75	0.83
	2000	0.00	37.17	127.44	78.57	8.46	0.00	0.00	251.64	0.81
	2007	0.00	32.94	122.58	79.20	8.55	0.00	0.00	243.27	0.78
	2013	0.00	29.43	121.32	82.26	11.52	0.00	0.00	244.53	0.78
	2016	0.00	27.45	113.76	72.45	10.89	0.00	0.00	224.55	0.72
Cuerpos de agua	1987	0.00	0.00	0.00	6.75	0.00	0.00	4.95	11.70	0.04
	1991	0.00	0.00	0.00	8.10	0.00	0.00	5.04	13.14	0.04
	1996	0.00	0.00	0.00	9.81	0.00	0.00	1.89	11.70	0.04
	2000	0.00	0.00	0.00	10.44	0.00	0.00	0.00	10.44	0.03
	2007	0.00	0.00	0.00	9.18	0.00	0.00	0.00	9.18	0.03
	2013	0.00	0.00	0.00	7.65	0.00	0.00	0.00	7.65	0.02
	2016	0.00	0.00	0.00	5.31	0.00	0.00	0.00	5.31	0.02

A continuación, se describirá el comportamiento de las coberturas introducidas por las actividades antrópicas a lo largo de la gradiente altitudinal.

La actividad agrícola, entre los años 1987 y 1991, estuvo concentrada en el intervalo de 2600--3000m (**Figura 47** y **Tabla 25**) con más de 2,600ha (9%) en ambos años. En ese mismo sub-período, la extensión de los cultivos agrícolas disminuía conforme se incrementaba la altitud. En 1996, esta cobertura mudó y ascendió 200m, lo que resultó en concentraciones a lo largo de los intervalos 2800-3000m, 3000-3200m y 3200-3400m hasta el 2016 (**Tabla 25** y **Figura 47**). Sin embargo, al margen del cambio de concentraciones respecto a la elevación, es notorio el aumento progresivo de la extensión agrícola en cada intervalo altitudinal con el paso de los años (**Figura 47**). Por otra parte, en los intervalos 2600-2800m y 3800-4200m, la cobertura agrícola disminuyó debido a la expansión urbana y minera con pérdidas acumuladas de 576ha (1.85%) y 55.1ha (0.17%) respectivamente, entre los años 1987 y 2016 (**Anexo 7**).

El cultivo de pastos concentra su mayor extensión en el intervalo de 2600-2800m con más de 1,500ha (4.8%) en cada año cartografiado (**Figura 47** y **Tabla 25**). A pesar de ello, en este intervalo se evidencia una tendencia hacia la reducción de esta actividad (**Figura 47**), como consecuencia de la expansión de áreas agrícolas (257.5ha) y urbanas (199ha) entre 1987 y 2016 (**Anexo 7**). Por otro lado, en intervalos de elevación como 3200-3400m, 3400-3600m y 3600-3800m se muestran tendencias de incremento hasta el 2013, ya en el 2016, la reducción global de esta cobertura ve afectada su expansión (**Figura 47**). La ausencia de concentración de este cultivo entre los 2800m y 3200m, es principalmente a que la agricultura está presente en estas elevaciones (**Figura 47**). En general, se describe a una cobertura con un patrón de aumento en extensión con el pasar de los años a lo largo de la gradiente de elevación.

Las áreas urbanas, representadas en su totalidad por la ciudad de Cajamarca, se ha concentrado principalmente, desde 1987, en el valle del río Maschón (2600-2800m), con un área de 407.8ha (1.3%) (**Tabla 25**). Esta cobertura se ha centralizado en dicho lugar durante el período 1987-2016 (**Figura 47** y **Tabla 25**) debido a las condiciones topográficas que se ofrecen para su expansión. En el 2016, con un total de 1,179ha (3.78%) (**Tabla 25**), su crecimiento ha sido la causa principal en la reducción de la actividad agrícola y el cultivo de pastos en esas elevaciones (**Anexo 7**).

La mayor extensión de la actividad de extracción minera metálica ha estado ubicada en el intervalo 3800-4200m entre 1987 (9.9ha) y 2016 (675.2ha) (**Figura 47** y **Tabla 25**). Por otra parte, en el intervalo 2800-3000m se da la extracción de hormigón, con un patrón de crecimiento irregular en su expansión (**Tabla 25**). Es a partir de 1996 que la extracción aurífera entre los 3800-4200m, principalmente, comenzó a expandirse, cubriendo el intervalo 3600-3800m, ya en el 2000, se expande desde los 3400m hasta los 3800m (**Figura 47**), aumentado su cobertura a lo largo de la gradiente de elevación. Todo lo descrito, debido a la llegada de la corporación Newmont al área de estudio en los 90's.

La concentración de plantaciones forestales, a lo largo de la gradiente de elevación, ha sido la más variable en comparación a otras coberturas no naturales. En 1987, esta se ubicó en el intervalo 3000-3200m (4.59ha) (**Tabla 25** y **Figura 47**). En 1991, esta cobertura se expande hasta los 3800m (**Figura 47**), siendo el intervalo 3600-3800m el que concentre su mayor extensión. Ya en el 2007, las plantaciones forestales se aglomeran en el intervalo 3200-3600m (**Figura 47**); años después, esta se desplaza 200m altitudinalmente y se estabiliza en ella con un total 621.9ha en el 2016 (**Anexo 7**).

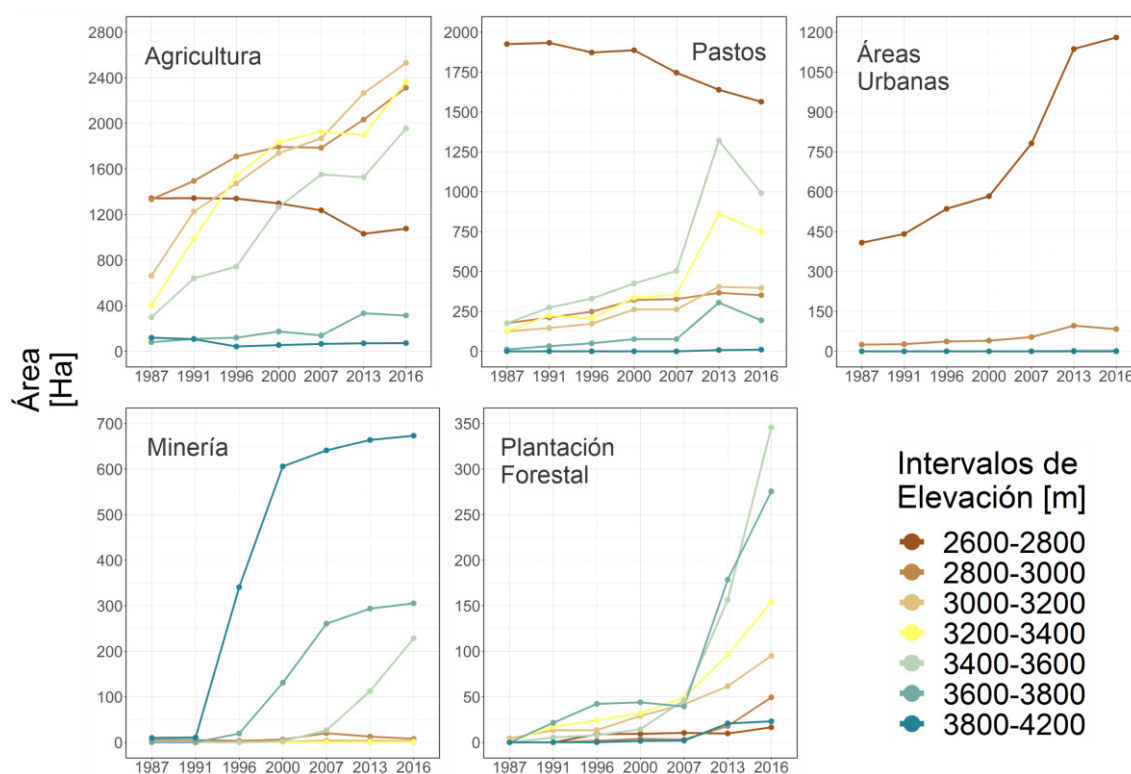


Figura 47 | Cambio de cobertura y uso de tierra, para coberturas no naturales, por intervalos de elevación entre los años 1987 y 2016.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25| Extensión de coberturas no naturales por intervalos de elevación.**Fuente:** Elaboración propia.

CUT	Año	Intervalos de elevación (metros)							Total [ha]	Total [%]
		2600-2800	2800-3000	3000-3200	3200-3400	3400-3600	3600-3800	3800-4200		
		[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]		
Agricultura	1987	1338.84	1333.89	666.99	403.11	300.87	79.56	120.51	4243.77	13.61
	1991	1340.28	1495.26	1226.79	990.27	643.32	110.43	107.37	5913.72	18.97
	1996	1335.60	1707.39	1475.10	1537.92	749.70	119.88	43.29	6968.88	22.35
	2000	1294.29	1791.90	1741.05	1833.39	1271.34	174.51	55.35	8161.83	26.18
	2007	1233.72	1784.25	1868.85	1925.37	1557.09	139.86	66.06	8575.20	27.51
	2013	1026.90	2030.13	2267.55	1896.57	1529.91	334.08	71.46	9156.60	29.37
	2016	1072.08	2308.59	2531.70	2365.38	1961.46	315.36	73.35	10627.92	34.09
Pastos	1987	1925.01	177.03	125.64	126.09	176.49	12.06	0.63	2542.95	8.16
	1991	1933.47	211.32	146.70	223.29	275.67	32.67	0.00	2823.12	9.06
	1996	1872.18	248.58	173.61	207.09	330.93	50.76	0.00	2883.15	9.25
	2000	1886.22	321.93	262.80	334.53	425.97	77.13	0.00	3308.58	10.61
	2007	1745.46	326.97	263.70	355.77	505.80	76.95	0.45	3275.10	10.51
	2013	1638.18	366.03	404.64	857.61	1323.99	306.00	8.10	4904.55	15.73
	2016	1563.39	350.73	397.35	746.28	993.96	195.21	11.07	4257.99	13.66
Área urbana	1987	407.79	26.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	433.98	1.39
	1991	440.64	27.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	468.27	1.50
	1996	535.14	38.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	573.21	1.84
	2000	582.21	41.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	623.25	2.00
	2007	780.30	54.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	835.20	2.68
	2013	1136.07	97.83	1.08	0.00	3.06	0.00	0.00	1238.04	3.97
	2016	1179.27	84.87	0.00	0.00	3.06	0.00	0.00	1267.20	4.06
Minería	1987	0.00	5.58	0.00	0.00	0.00	0.00	9.99	15.57	0.05
	1991	0.00	5.40	0.09	0.00	0.00	0.00	10.89	16.38	0.05
	1996	0.00	3.42	0.09	0.00	0.00	19.53	340.92	363.96	1.17
	2000	0.00	6.39	0.81	0.00	2.34	129.96	607.05	746.55	2.39
	2007	0.00	20.43	4.41	0.00	26.01	259.65	643.05	953.55	3.06
	2013	0.00	12.78	3.69	0.00	111.69	292.68	665.73	1086.57	3.49
	2016	0.00	7.83	3.06	0.00	226.98	305.10	675.18	1218.15	3.91
Plantación forestal	1987	0.00	0.00	4.59	0.99	0.00	0.00	0.00	5.58	0.02
	1991	0.00	0.00	13.14	17.46	5.31	21.60	0.09	57.60	0.18
	1996	8.82	1.98	13.32	24.48	7.83	42.30	0.45	99.18	0.32
	2000	9.36	4.23	28.80	32.13	14.31	43.92	1.89	134.64	0.43
	2007	10.35	3.33	41.58	49.59	46.26	39.33	2.16	192.60	0.62
	2013	9.45	18.18	61.38	96.03	156.51	178.74	21.24	541.53	1.74
	2016	16.11	50.04	94.86	153.00	345.24	276.75	23.40	959.40	3.08

CAPÍTULO 6: DISCUSIONES

6.1. Evaluación e implicancias de la metodología

La reducción del ruido espectral causado por la concentración de gases en la atmósfera y/o las condiciones de iluminación en la superficie y el aporte de la homogenización espectral con la segmentación de las imágenes, hicieron que la metodología empleada sea la más adecuada para entornos de distribución heterogénea de coberturas en regiones altoandinas, tal como se confirma en los estudios de **Tovar et al. (2013)** y **GRC (2014)**.

El pseudo-cambio de pastos por herbazales o Jalca es debido a su similitud espectral; lográndose contrarrestar, en cierta medida, con la transformación Tasseled Cap como covariable. Además, la adecuada discriminación entre las áreas de extracción minera y las áreas urbanas se logró con los modelos de elevación y pendiente como covariables. Por lo tanto, el sesgo generado en los cambios observados se redujo con la optimización del modelo de clasificación a partir de la añadidura de variables complementarias.

Basado en las características metodológicas mencionadas, se lograron óptimas precisiones promedio del productor en la detección de coberturas como las áreas de extracción minera (100%), cuerpos de agua (100%), herbazales (99%), pastos (98%), áreas agrícolas (93%), áreas urbanas (93%) y plantaciones forestales (89%) (**Tabla 7-13**). Por otro lado, los bosques montanos (88%), matorrales (84%) y la Jalca (79%) (**Tabla 7-13**) mostraron valores de precisión promedio del productor relativamente bajos, pero con precisiones del usuario altos, lo que deduce en un sub-mapeo de estos en la cuenca; sin embargo, al representar, en conjunto, únicamente el 3.5% (2016) del área de estudio, la prioridad se centró en encontrar el mejor rendimiento del modelo para las coberturas más relevantes (herbazales, agricultura, pastos, minería, plantaciones forestales y áreas urbanas), ya que estas son nuestro principal objetivo.

6.2. Análisis de LUCC y patrones espaciales

Las áreas de paisaje natural han sufrido grandes cambios en su cobertura y uso, como consecuencia del impacto acumulado de las actividades antrópicas durante el período 1987-2016 (**Figura 37**), principalmente por la expansión agrícola, urbana y minera.

La reducción en extensión de coberturas naturales, a TCA's de -1.61%/año (1987-2007) y -1.88%/año (2000-2013) en la cuenca del río Mashcón, son inferiores a las TCA's de -2.33%/año (1987-2007) y -2.06%/año (2001-2013) mostradas en los estudios de **Tovar et al (2013)** y **GRC (2014)** respectivamente. Esto se debe principalmente a la no

adecuada asignación categórica de los píxeles en la imagen, lo cual es justificado técnicamente por la ausencia de variables complementarias en la clasificación de **Tovar et al (2013)** y la falta de la homogenización espectral a partir de la corrección topográfica en ambos estudios.

Las TCA's de $-3.46\%/año$ (2013-2016) y $-0.69\%/año$ (2000-2007) (**Tabla 16**), que, siendo los sub-períodos más corto y largo analizados respectivamente, son las TCA's más y menos agresivas respecto a los demás sub-períodos involucrados entre 1987 y 2016.

De lo mencionado en el párrafo anterior, fueron los herbazales los más severamente afectada con una TCA de $-2\%/año$ (2000-2013), similar al $-1.98\%/año$ presentado por el EE-LUCC (2001-2013) (**GRC, 2014**). La pérdida de esta cobertura afecta el almacenamiento y suministro hídrico ya que grandes áreas de pastizales andino-tropicales, como los herbazales, brindan estos servicios en su entorno (**Buytaert et al., 2006**).

La Jalca, al igual que los Páramos, son ecosistemas de alta montaña que cumplen el rol regulador del ciclo hidrológico (**Buytaert et al., 2006**). Estas se redujeron $24.6ha$ (0.07%) a una TCA de $-0.41\%/año$ durante el sub-período 1987-2007, dicha pérdida es extremadamente inferior a las $3449.9ha$ (TCA = $-2.4\%/año$) de pérdida de Jalca para **Tovar et al. (2013)** en el mismo sub-período y área de estudio. Esta diferencia es debido a los enfoques de mapeo utilizados. **Tovar et al. (2013)** considera, para esta categoría, a toda cobertura de pastizal que forma parte del ecosistema como conjunto paisajístico. Sin embargo, en este estudio nos enfocamos en el mapeo de áreas de Jalca ubicadas en regiones de relieve cóncavo, emplazadas sobre suelos de tipo *Andosoles*, *Paramosoles* y *Páramo-Andosoles* (**Figura 11**) (**Krois, Abendroth, Schulte, & Schneider, 2013**) y de pendiente baja ($0-15^\circ$), ya que en ellas se dan las condiciones de mayor acumulación hídrica, a diferencia de otras coberturas, para posteriormente ser distribuidas hacia altitudes bajas según las características del flujo subterráneo local.

Otras categorías naturales, como los matorrales y bosques montanos, tienen TCA's de $-0.97\%/año$ y $-0.56\%/año$ respectivamente, para el período 1987-2016 (**Table 16**). Situación totalmente opuesta a la observada para el área natural protegida (ANP) del Parque Nacional Abiseo donde los bosques montanos muestran signos de recuperación en su extensión (**Kintz, Young, & Crews-Meyer, 2006**), esto como resultado de la adecuada gestión del territorio a través de políticas de conservación en áreas naturales

vulnerables, dado que en esta ANP se encuentran las últimas áreas continuas bosques montanos occidental en el norte del Perú (**Weigend, Rodriguez, & Arana, 2005**).

Entonces, no es casualidad mencionar que la pérdida de áreas de cobertura natural es causada principalmente por la expansión de coberturas relacionadas con actividades productivas, que involucran no solo a la agricultura (+3.17%/año, período 1987-2016) sino también pastizales sembrados (+1.78%/año, sub-período 1987-2016) (**Table 16**). En el departamento de Cajamarca, la principal explicación al aumento en extensión de la cobertura agrícola está fuertemente relacionada con la producción de derivados lácteos, que requieren de la siembra de pastos para el ganado. En la actualidad, dos fábricas de producción láctea están presentes en la región (compañía Nestle y GLORIA S.A.) (**Escurre, 2001**), lo que generó que la producción de leche aumentara de 88,052 a 208,580TM entre 1996 y 2003 (**INEI, 2004**), viéndose esto reflejado en una de las mayores TCA (+3.44%/año, sub-período 1996-2000) detectadas entre 1987-2016 (**Table 16**). Además, importante resaltar que la superficie agrícola ha aumentado para toda el departamento de Cajamarca, con una mayor TCA (+4.7%/año) que en cualquier otro departamento de la región andina e incluso a nivel nacional (+2.8%/año) para el período 1993-2007 (**MINAG, 2008**). Estas cifras, al igual que los estudios de **Tovar et al. (2013)** (+1.26%/año, sub-período 1987-2007) y el EE-LUCC (+3.79%/año, sub-período 2001-2013) (**GRC, 2014**) confirman nuestros resultados y enfatizan la importancia del monitoreo a escala intradecadal de la expansión de áreas cultivadas. Y al igual que la recuperación de otras áreas naturales y disminución de áreas agrícolas tanto en ANP (**Kintz et al., 2006**) como en zonas no protegidas (**Vanacker, Govers, Barros, Poesen, & Deckers, 2003**), nuestros son totalmente opuesto.

Las nuevas áreas agrícolas en la cuenca del río Mashcón están localizadas, en un su mayoría, en zonas de mayor altitud, similar a la región norte de los Andes ecuatorianos para el período 1960-1990 (**López Sandoval, 2004**). En este estudio, el límite superior de las áreas agrícolas mudó hacia intervalos ubicados entre los 3600 y 4000 m de elevación. Además, **Hess (1990)** muestra que también hubo un desplazamiento ascendente de áreas cultivadas en las zonas centro y sur de Ecuador. Entonces, los resultados anteriores y los de este estudio demuestran que el desplazamiento ascendente de coberturas relacionadas con actividades productivas (**Figure 46 y Figura 47**), como la agricultura, obedecen a un patrón regional durante los últimos 56 años en los Andes del norte. Ahora, la razón principal de esta expansión podría estar asociada a variables

socioeconómicas como el crecimiento demográfico (**INEI, 2018**), reflejado en el crecimiento del área urbana ($>833ha$, 2.67% del área de estudio), y los cambios en la tenencia de tierra (**López Sandoval, 2004; van Gils & Loza Armand Ugon, 2006**).

CONCLUSIONES

El monitoreo de la dinámica de LUCC a escala de tiempo intradecadal, como los presentados en este estudio, debe ser incentivado como una herramienta de gestión para la identificación de patrones de distribución de áreas vinculadas con la actividad extractiva-productiva y así diseñar estrategias de conservación. En nuestra área de estudio, se produjo una notable pérdida de cobertura natural entre 1987 y 2016. Con pérdidas de extensas áreas de herbazales y en menor intensidad las de Jalca, matorrales y bosques de montaña. Estas pérdidas ocurrieron a un ritmo distinto en cada uno de los períodos de tiempo analizados. Principalmente se resalta el reemplazo de herbazales por áreas agrícolas, mostrando un desplazamiento ascendente de esta actividad. Sin embargo, los cambios relativos (TCA) más importantes en el están vinculados a las plantaciones forestales y a la minería.

Especialmente en los ecosistemas altoandinos, la información de pérdida de cubierta terrestre y sus cambios a lo largo de la gradiente de elevación pueden dar como resultado información útil para los tomadores de decisiones. Permitiendo sugerir áreas prioritarias no solo para la conservación, sino también para la expansión ordenada de coberturas relacionas con las actividades humanas, donde afectarán en menor intensidad las áreas naturales. Creemos que lo propuesto será de utilidad para estudios involucrados en el impacto del LUCC en la regulación del ciclo hidrológico y replicable en otras áreas con condiciones similares.

Los resultados mostrados en la cuatificación espacio-temporal por tipo de cobertura y uso de tierra contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento de cada una de estas, y así establecer entornos de paisaje natural con fines de conservación y reducción de los impactos causados por la constante presión de las actividades antrópicas en la región norte de los Andes peruanos. Además, pese a la existencia de estudios realizados por el Gobierno Regional de Cajamarca (ZEE y EE-LUCC), nuestros resultados al ser de carácter intradecadal ayudarían en una probable zonificación de áreas vulnerables (herbazales y Jalca) basados en la capacidad que tienen a escala temporal para generar escenarios futuros de la distribución de cada cobertura a lo largo de la gradiente de elevación. Lo que permitiría plantear estrategias de gestión para una la conservación más adecuada.

RECOMENDACIONES

- Una adecuada y cuidadosa etapa del procesamiento de la información satelital es crucial en la obtención de resultados espacialmente coherentes y de alta precisión. Por lo que esta tesis es un aporte como guía técnica para el procesamiento de imágenes satelitales para el análisis multitemporal de LUCC.
- El empleo de otras variables predictoras para mejorar la discriminación entre herbazales, jalca y pastos cultivados.
- El monitoreo de la dinámica de LUCC a escala de tiempo intradecadal, como los presentados en este estudio, debe ser incentivado como una herramienta de gestión para la identificación de patrones de distribución de áreas vinculadas con la actividad extractiva-productiva y así diseñar estrategias de conservación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto, “Influencia de las desoladas tierras altas en la erosión y conservación de los suelos andinos, y la identificación de su papel en la regulación de los recursos hídricos en las grandes ciudades altoandinas” financiado por la Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt). Fue implementado por el Instituto Geofísico Nacional del Perú (IGP), la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, la Universidad Nacional de Cajamarca y SEDACAJ. Además, nos gustaría agradecer a Alicia Quispe del Gobierno Regional de Cajamarca (directora del "Proyecto de Zonificación Económica y Ecológica de la Región de Cajamarca) por su ayuda en la obtención de datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. (2010). *Plan de Gestión de los Recursos Hídricos en las cuencas Mashcón y Chonta con énfasis en el afianzamiento hídrico de las subcuencas Azufre, Paccha y Río Grande de Chonta, Cajamarca, Perú*. Autoridad Nacional del Agua.
- ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected low resolution. Includes Material* © JAXA/METI 2007. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>
- Becker, D. (1983). *The New Bourgeoisie and the Limits of Dependency: Mining, Class, and Power in “Revolutionary” Peru*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Benjamin, A., Horning, N., Schwalb-willmann, J., Hijmans, R. J., & Leutner, M. B. (2018). *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis. R package version 0.2.3*. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=RStoolbox>
- Berk, A., Bernstein, L., Anderson, G., Acharya, P., Robertson, D., Chetwynd, J. H., & Adler-Golden, S. M. (1998). MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 65, 367–375.
- Berk, A., Bernstein, L. S., & Robertson, D. C. (1989). MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN7. GL-TR-89-0122. *Force Geophysical Laboratory, Hanscom AFB, MA*, 38.
- Bernstein, L., Jin, X., Gregor, B., & M., S. (2012). Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 111719. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, T., & Cutler, A. (2018). Package ‘randomForest.’ *The Comprehensive R Archive Network*, 4. <https://doi.org/10.1023/A>
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., Da Fonseca, G. A. B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., ... Rodrigues, A. S. L. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.1127609>
- Bury, J. (2005). Mining mountains: Neoliberalism, land tenure, livelihoods and the new Peruvian mining industry in Cajamarca. *Environment and Planning A*, 37, 221–239.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Cárdenas, E., Ocampo, J., & Thorp, R. (2000). *An Economic History of Twentieth-century Latin America* (E. Cárdenas, J. Ocampo, & R. Thorp, Eds.). New York: Palgrave.
- Castillo, G., & Brereton, D. (2018). The country and the city: Mobility dynamics in mining regions. *Extractive Industries and Society*, 5(2), 307–316.

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.02.009>

- Céleri, R., Buytaert, W., De Bièvre, B., Tobón, C., Crespo, P., Molina, J., & Feyen, J. (2009). Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*, (April 2010), 209–212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4187.3608>
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L., & Ali, E.-. (2009). Remote Sensing of Environment Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chavez, P. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 459–479.
- Cihlar, J., Latifovic, F., Huang, R., & Dixon, R. (1998). Can interannual land surface signal be discerned in composite AVHRR data? *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D18), 23163–23172. <https://doi.org/10.1029/98JD00050>
- Civco, D. L. (1989). Reduction of the Topographic Effect in Lands At Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1303–1309.
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Colby, J. D. (1991). Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(5), 531–537. <https://doi.org/10.1117/12.529775>
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)
- Dai, X., & Khorram, S. (1998). The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1566–1577.
- Diez de Arribas, J. M., & Nicolás, E. (2001). Software de corrección geométrica automática de imágenes NOAA. *Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá*.
- Dore, E. (1988). *The Peruvian Mining Industry: Growth, Stagnation and Crisis*. Boulder, CO: Westview Press.
- Dozier, J., & Strahler, A. (1983). Ground investigations in support of Remote Sensing. *Manual of Remote Sensing. American Society of Enviroment*, 959–986.
- Escurra, E. M. (2001). Situación de la ganadería lechera en Cajamarca [Status of diary cattle in Cajamarca]. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 12(2), 21–

26 [in Spanish].

- European Environment Agency. (1994). CORINE Land Cover - Technical guide. *Office for Official Publications of the European Communities*.
- FAO. (2006). World reference base for soil resources 2006 (Vol. 103). In *Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- FAO. (2013). Diagnóstico de los Ecosistemas de Montaña en el Perú. *Proyecto de Cooperación Técnica Regional (TCP/ RLA/3301): Fortalecimiento de La Gestión Participativa Para El Desarrollo Sostenible de Los Andes. Elaborado Por Mario Tapia [in Spanish]*.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Gonima, L. (1993). Simple algorithm for the atmospheric correction of reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1179–1187. <https://doi.org/10.1080/01431169308904403>
- GRC. (2011). Zonificación ecológica y económica territorial del departamento de Cajamarca. *Gobierno Regional de Cajamarca. Elaborado Por Alicia Quispe [in Spanish]*.
- GRC. (2014). Estudio Especializado: Análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra. *Gobierno Regional de Cajamarca. Elaborado Por Germán Alcátara [in Spanish]*.
- GRC. (2017). Estadística Agraria - Dirección Regional de Agricultura. Retrieved from Gobierno regional de Cajamarca [in Spanish] website: <http://www.agriculturacajamarca.gob.pe/estadistica-agraria>
- Guzman, O. (2005). *Aproximación a un método de corrección atmosférica para imágenes de alta resolución en una atmósfera tropical limpia* (pp. 14,23,39,50-53,97,105-015). pp. 14,23,39,50-53,97,105-015. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hess, C. (1990). 'Moving up—moving down': Agro-pastoral land-use patterns in the Ecuadorian Paramos. *Mountain Research and Development*, 10(4), 333–342.
- Hijmans, R. J., van Etter, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Summer, M., Greenberg, J. A., ... Ghosh, A. (2017). *Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.6-7*. (Vol. 2, p. 230). Vol. 2, p. 230. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=raster>
- IGAC -CIAF. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Centro de Investigación y Desarrollo En Información Geográfica*, 1, 46.
- INEI. (2004). *(Peru Statistical Compendium 2004) Perú Compendio estadístico 2004*. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática. [in Spanish].
- INEI. (2018). *Perú: Perfil Sociodemográfico del Perú*. Retrieved from <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

- Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*.
- Jensen, J R. (2000). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. In *Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ* (Vol. 1).
- Jensen, John R, & Cowen, D. C. (1999). *Remote Sensing of Urban / Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes*. 65(5), 611–622.
- Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976). The tasselled cap - A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, U.S.A, 29 June-1 July 1976*, 41–51.
- Kettig, R., & Landgrebe, D. a. (1976). Classification of Multispectral Image Data by Extraction and Classification of Homogeneous Objects. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1), 19–26. <https://doi.org/10.1109/TGE.1976.294460>
- Kintz, D., Young, K., & Crews-Meyer, K. (2006). Implications of land use/land cover change in the buffer zone of a national park in the Tropical Andes. *Environmental Management*, 38(2), 238–252.
- Kobayashi, S., & Sanga-Ngoie, K. (2009). A comparative study of radiometric correction methods for optical remote sensing imagery: the IRC vs. other image-based C-correction methods. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 285–314.
- Körner, C., & Spehn, E. (Eds. . (2002). Mountain biodiversity: A global assessment. *USA: The Parthenon Publishing Group*.
- Krois, J., Abendroth, S., Schulte, A., & Schneider, M. (2013). Dry Season Runoff and Natural Water Storage Capacity in the High Andean Catchment of the River Ronquillo in the Northern Sierra of Peru. *Journal of Latin American Geography*, 12(3), 59–89. <https://doi.org/10.1353/lag.2013.0042>
- Krois, J., & Schulte, A. (2014). GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography*, 51, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.006>
- Kruckeberg, A. R., & Rabinowitz, D. (1985). Biological Aspects of Endemism in Higher Plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16(1), 447–479. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.16.110185.002311>
- Llambí, L. D. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos: Proyecto Páramo Andino. *Proyecto Páramo Andino*.
- Llerena, C., Hermoza, R., & Llerena, L. (2007). *Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas*. 609–615.
- López Sandoval, M. (2004). *Agricultural and Settlement frontiers in the Tropical Andes: The paramo belt of northern Ecuador, 1960–1990*. PhD Thesis. Institut für Geographie and der Universität Regensburg, Germany.
- Matthew, M., Adler-Golden, S., Berk, A., Richtsmeier, S., Levine, R., Bernsteina, L., ... Miller, D. (2000). *Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based*

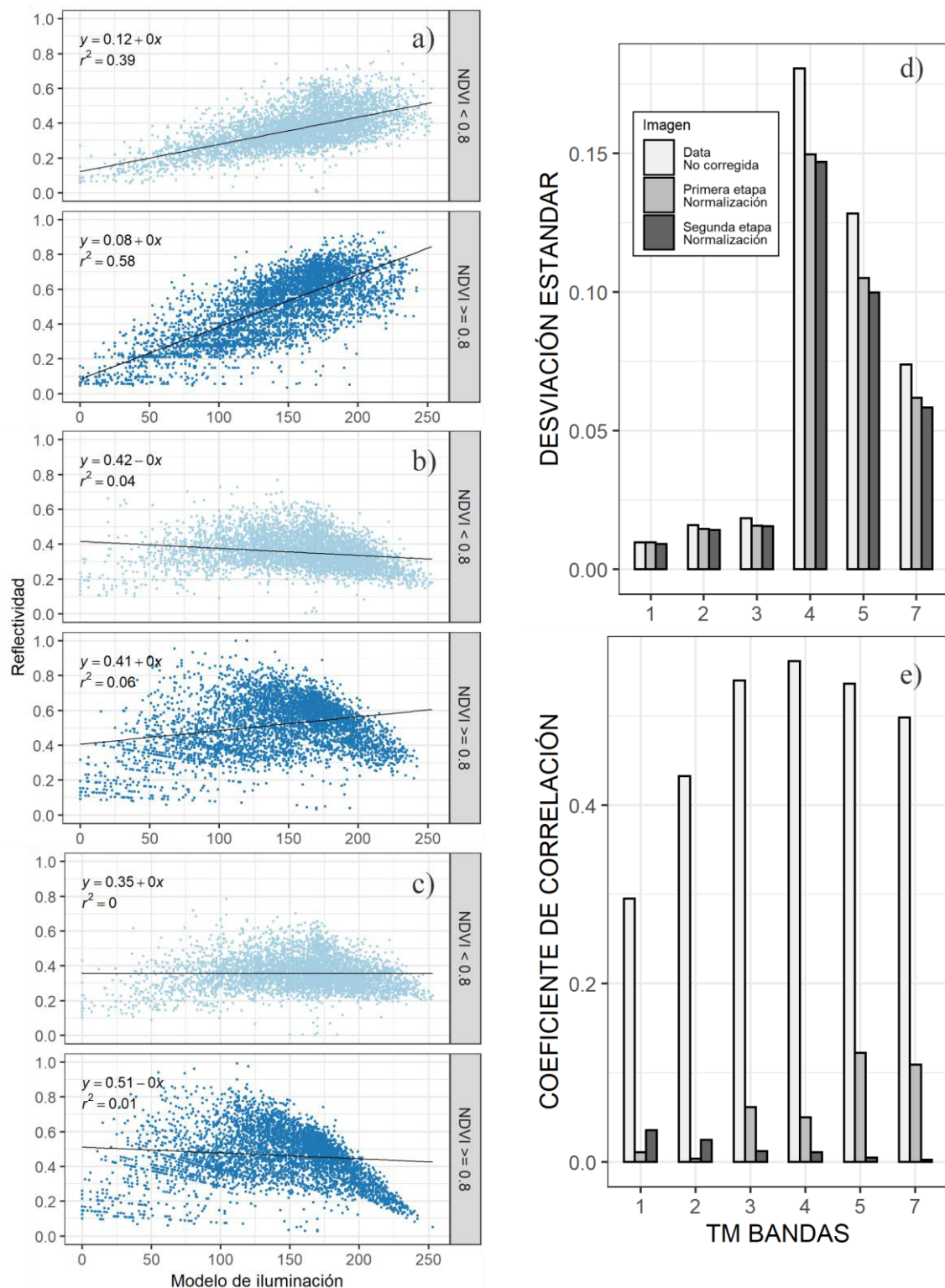
algorithm. 4049, 199–207.

- McDonald, E. R., Wu, X., Accetta, P. A., & Campbell, N. A. (2000). Illumination correction of Landsat TM data in south east NSW. *Paper Presented at: Proceedings of the Tenth Australasian Remote Sensing Conference*.
- Meyer, P., Itten, K. I., Kellenberger, T., Sandmeier, S., & Sandmeier, R. (1993). Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48, 17–28. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9162-3>
- MINAG. (2008). *Boletín Estadística Agraria mensual – Julio 2008 (Monthly Agrarian Statistics Bulletin – July 2008)* (p. 147). p. 147. Retrieved from <http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/boletineselectronicos/estadisticaagrariamensual/2008/BemsaJulio2008.pdf> [in Spanish]
- MINAM. (2014). Protocolo. Analisis de las dinamicas de cambio de cobertura de la tierra en la comunidad andina. In *Ministerio de Ambiente del Perú*.
- MINEM. (2000). *Plan de referencia para Minería 2000-2009*. Lima.
- MINEM. (2018). Reportes de Producción Minera. Retrieved from http://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=1&idCategoria=10v
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Owen, R., Morelli, J., & Hernández, R. (2007). *Evaluación Del Potencial De Consorcios Para La Reforestación En La Sierra Peruana*. 60.
- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>
- Peñuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9(2), 131–140.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Richter, R. (1996). Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computer and Geosciences*, 22, 675–681.
- Robinove, C. J., Chavez, P. S., Gehring, D., & Holmgren, R. (1981). Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, 11(C), 133–156. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(81\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90014-6)

- Rosenfeld, H. (1982). Sample desing for estimating change in land use and land cover. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48, 793–801.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. . W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Presented at Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA, Washington, D.C, 1*, 309–317.
- Sánchez-Vega, I., & Dillon, M. O. (2006). Jalca. In M. Moraes R., B. Øllgaard, L. P. Kvist, F. Borchsenius, & H. Balslev (Eds.), *Botánica Económica de los Andes Centrales* (pp. 77–90). La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés [In Spanish].
- Skidmore, T., & Smith, P. (2001). *Modern Latin America* ((Oxford University Press, Ed.). New York.
- Slater, P. (1980). *Remote sensing, optics and optical systems*.
- Stehman, S. (1992). Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 1343–1350.
- Teillet, P. M., Guindon, B., & Goodenough, D. G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84–106. <https://doi.org/10.1080/07038992.1982.10855028>
- Thorp, R., & Bertram, I. (1978). *Peru 1890 - 1970: Growth and Policy in an Open Economy*. New York: Columbia University Press.
- Torres, F., & López, G. (2008). *Caracterización del ecosistema Páramo en el norte del Perú: ¿Páramo o Jalca?* Piura.
- Tovar, C., Duivenvoorden, J. F., Sánchez-Vega, I., & Seijmonsbergen, A. C. (2012). Recent Changes in Patch Characteristics and Plant Communities in the Jalca Grasslands of the Peruvian Andes. *Biotropica*, 44(3), 321–330. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00820.x>
- Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., & Duivenvoorden, J. F. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 112(1), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.003>
- Townshend, J. R., Justice, C. O., Gurney, C., & McManus, J. (1922). The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 1054–1060.
- USGS. (2016). Landsat — Earth Observation Satellites Landsat Missions : Imaging the Earth Since 1972. *United States Geological Survey*, 1(1).
- van Gils, H., & Loza Armand Ugon, A. (2006). What drives conversion of tropical forest in Carrasco province, Bolivia? *Ambio*, 35(2), 81–85.
- Vanacker, V., Govers, G., Barros, S., Poesen, J., & Deckers, J. (2003). The effect of short-term socio-economic and demographic change on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical

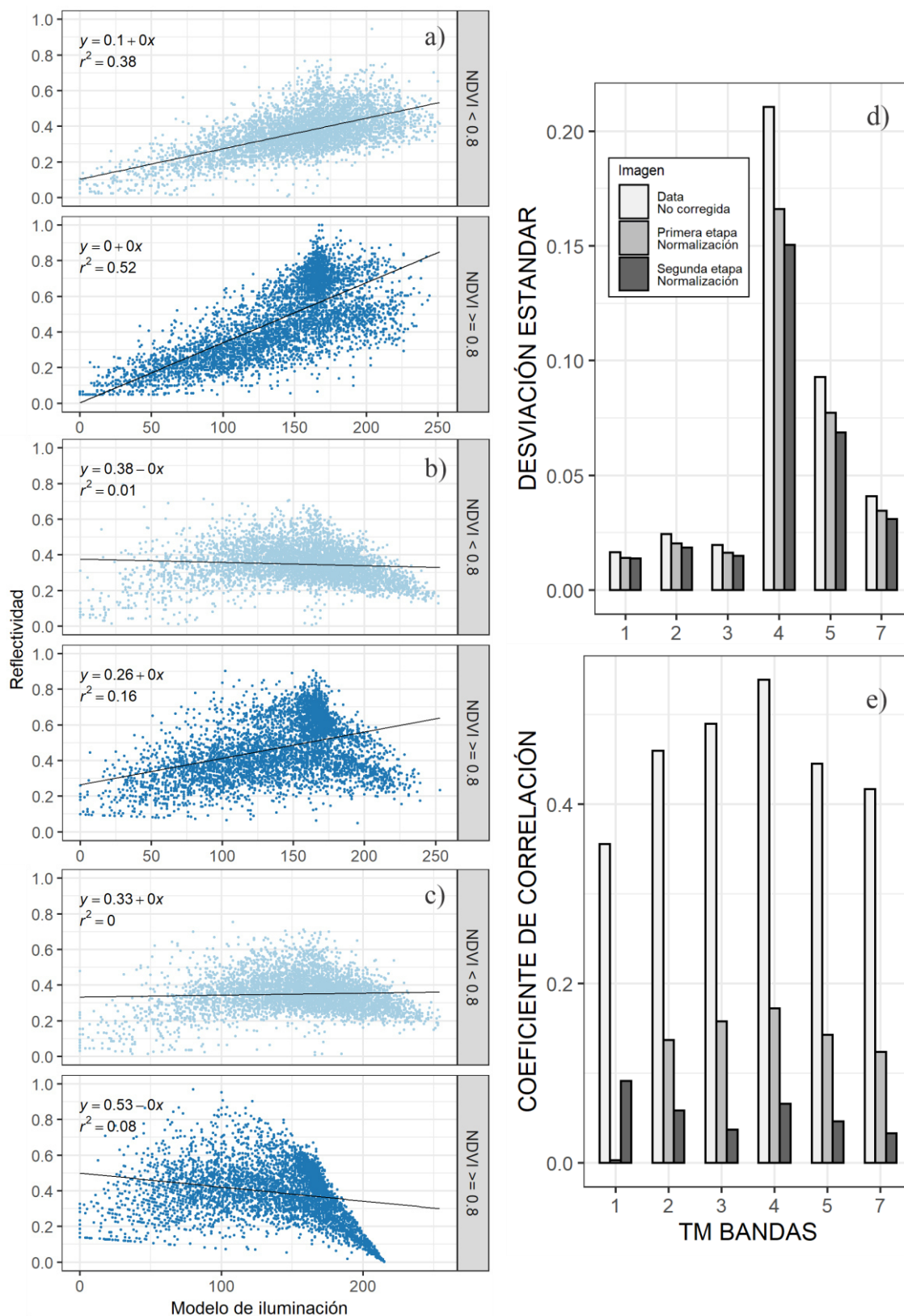
- mountainous catchment Ecuador. *Landscape Ecology*, 18, 1–15.
- Vásconez, P. M., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 91–109.
- Vega, L., Hirata, Y., Ventura, L., & Serrudo, N. (2018). Natural Forest Mapping in the Andes (Peru): A Comparison of the Performance of Machine-Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 10(5), 782. <https://doi.org/10.3390/rs10050782>
- Vermote, E. F., Tanre, D., Deuzé, J. L., Herman, M., & Morcrette, J.-J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 675–686. <https://doi.org/10.1055/s-2007-963706>
- Wang, F., & Rudin, C. (2015). *Causal Falling Rule Lists*. 38, 1013–1022. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1510.05189>
- Weigend, M., Rodriguez, E., & Arana, C. (2005). The relict forests of Northwest Peru and Southwest Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, 12(2), 185–194.
- Yeh, Y. R., Huang, C. H., & Wang, Y. C. F. (2014). Heterogeneous domain adaptation and classification by exploiting the correlation subspace. *IEEE Transactions on Image Processing*, 23(5), 2009–2018. <https://doi.org/10.1109/TIP.2014.2310992>

ANEXOS



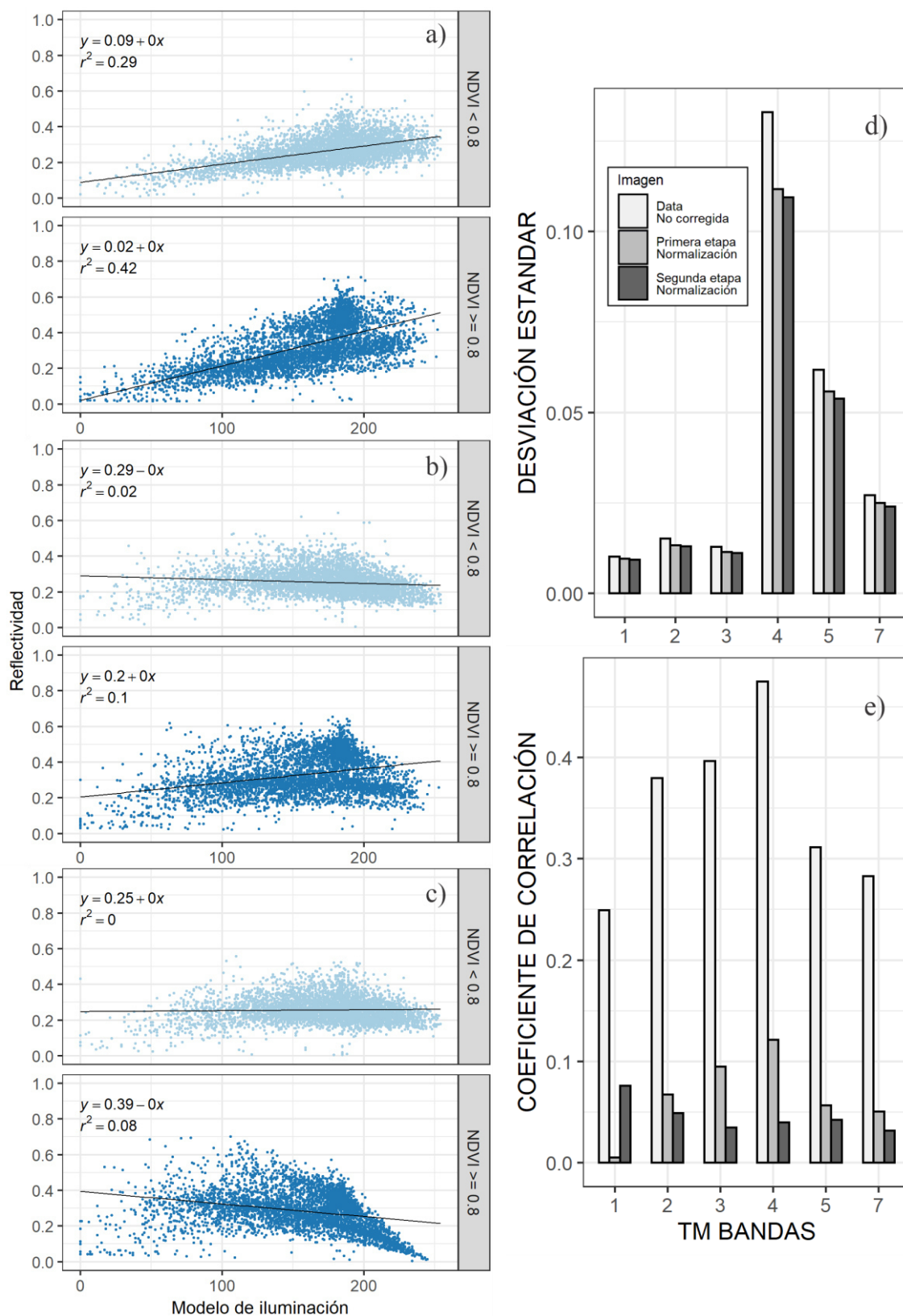
Anexo 1| Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con $NDVI \geq 0.8$ antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 5TM del 04 de julio de 1991.

Fuente: Elaboración propia



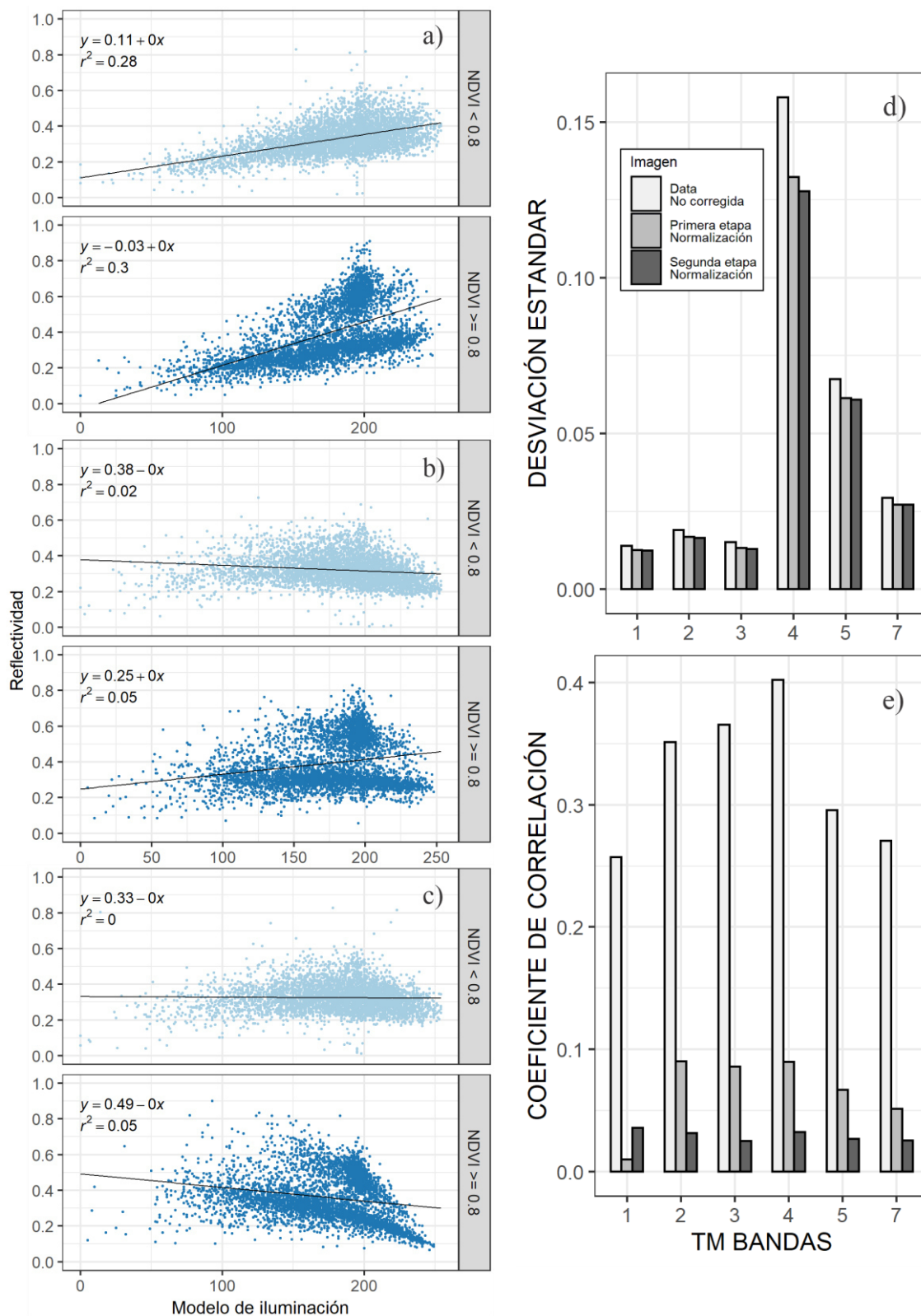
Anexo 2 Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con $NDVI \geq 0.8$ antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 5TM del 17 de julio de 1996.

Fuente: Elaboración propia



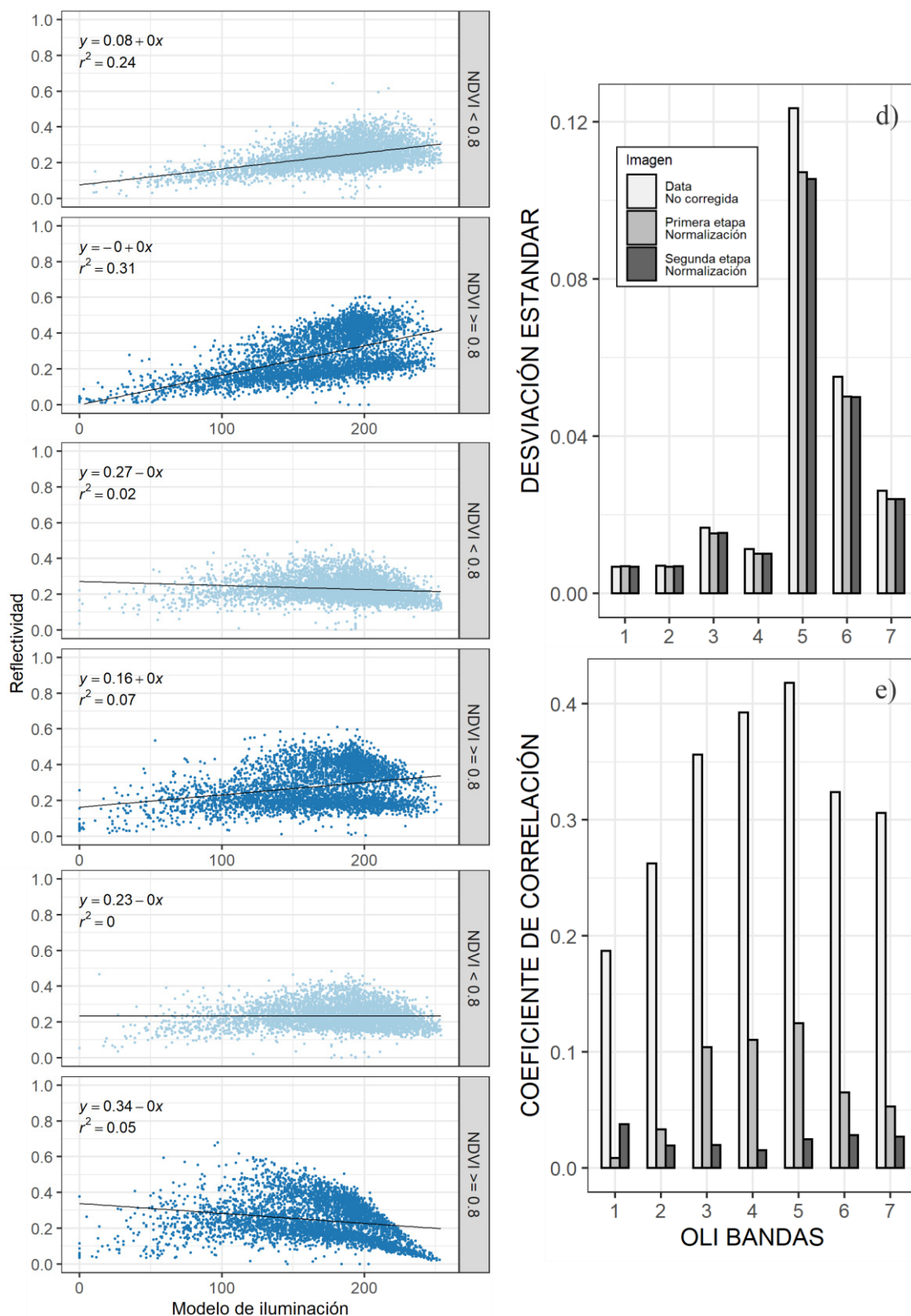
Anexo 3] Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con NDVI ≥ 0.8 antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 5TM del 28 de julio de 2000.

Fuente: Elaboración propia



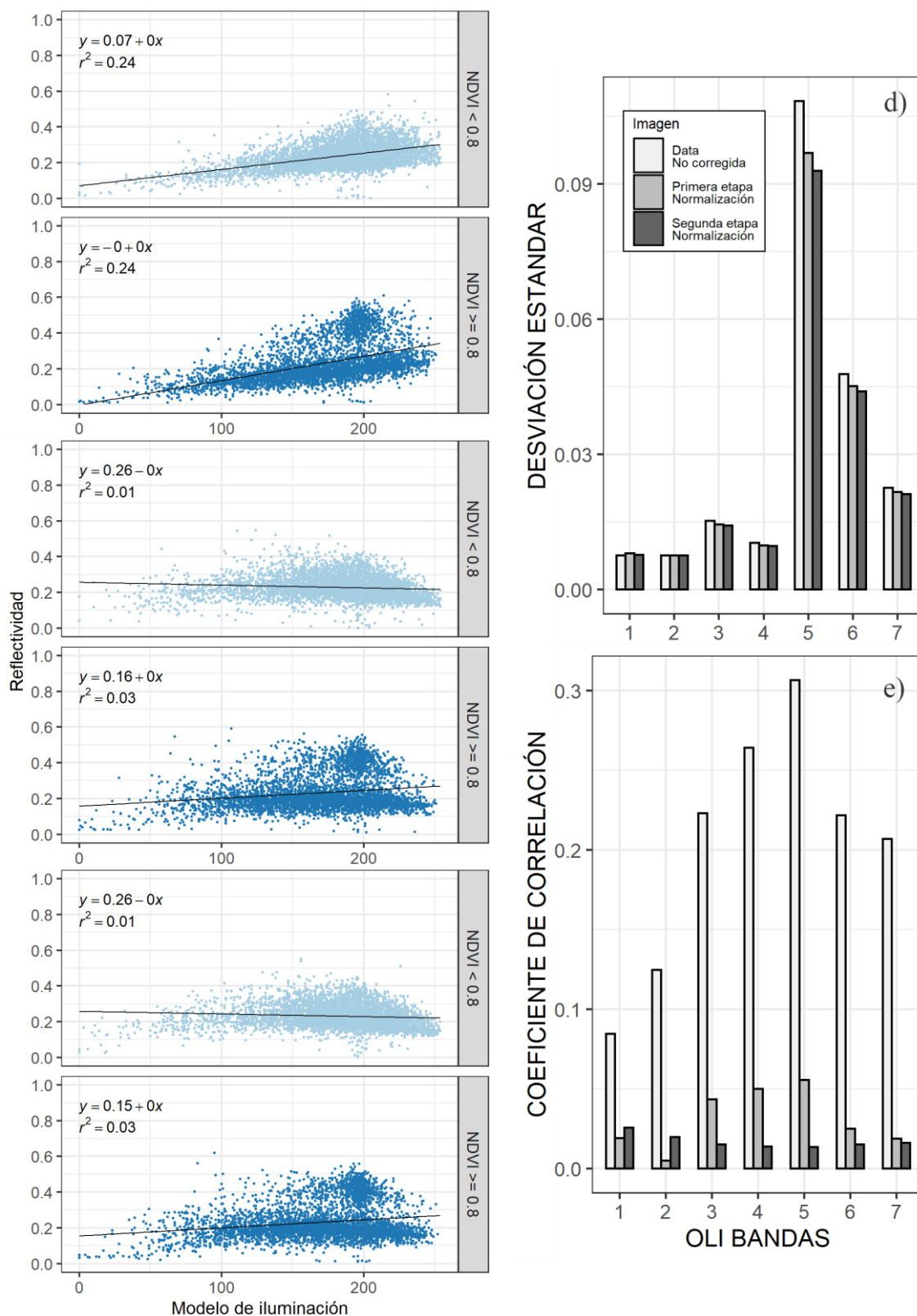
Anexo 4] Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con $NDVI \geq 0.8$ antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 5TM del 01 de agosto de 2007.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 5] Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con NDVI ≥ 0.8 antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 8OLI del 13 de julio de 2013.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 6] Gráficos de regresión lineal entre el modelo de iluminación y la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano para 5000 píxeles con valores superiores e inferiores al umbral de 0.8 de NDVI, para la imagen (a) no normalizada, (b) normalizada en la primera etapa y (c) normalizada en la segunda etapa. Variación del (d) coeficiente de correlación (reflectividad - modelo de iluminación) y (e) la desviación estándar (reflectividad) para coberturas con NDVI ≥ 0.8 antes y después a la primera y segunda normalización, bajo una muestra de 3000 píxeles. Imagen Landsat 8OLI del 16 de julio de 2016.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7 | Tabla de cambio de cobertura y uso de tierra por rangos altitudinales.**Fuente:** Elaboración propia.

Cambio de Cobertura y Uso de Tierra	Área [ha]						
	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Agricultura a Agricultura entre 2600-2800	1137.1	1104.6	1138.7	1020.5	801.5	832.0	662.7
Agricultura a Agricultura entre 2800-3000	1167.2	1311.6	1477.6	1507.9	1535.9	1794.9	1096.7
Agricultura a Agricultura entre 3000-3200	525.5	964.3	1152.5	1363.4	1477.6	1872.1	480.2
Agricultura a Agricultura entre 3200-3400	243.8	747.5	1135.2	1363.5	1274.8	1533.3	188.5
Agricultura a Agricultura entre 3400-3600	158.6	323.2	460.2	786.2	740.6	1041.0	103.5
Agricultura a Agricultura entre 3600-3800	63.8	72.8	67.9	72.0	27.7	128.7	17.6
Agricultura a Agricultura entre 3800-4200	93.1	30.4	40.1	46.8	50.0	58.7	47.7
Agricultura a Herbazal entre 2600-2800	25.3	10.0	12.8	18.5	7.4	9.7	10.6
Agricultura a Herbazal entre 2800-3000	79.7	78.3	103.0	176.9	88.6	84.0	26.4
Agricultura a Herbazal entre 3000-3200	82.3	177.7	164.5	253.5	159.2	186.7	31.7
Agricultura a Herbazal entre 3200-3400	73.2	167.1	229.8	294.7	165.7	135.5	9.8
Agricultura a Herbazal entre 3400-3600	65.6	230.5	163.5	292.9	189.4	259.8	11.2
Agricultura a Herbazal entre 3600-3800	8.6	30.0	25.5	83.5	17.3	165.1	8.2
Agricultura a Herbazal entre 3800-4200	25.5	37.9	1.3	6.2	8.4	2.4	7.3
Agricultura a Jalca entre 3400-3600	0.6	2.9	2.2	20.2	5.9	5.8	0.0
Agricultura a Jalca entre 3600-3800	0.0	0.0	1.1	1.1	0.4	1.8	0.0
Agricultura a Minería entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	3.4	0.5	0.0	0.0
Agricultura a Minería entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Agricultura a Minería entre 3800-4200	0.0	37.4	0.0	0.0	0.0	0.0	55.1
Agricultura a Bosques montanos entre 2600-2800	2.2	7.8	5.6	4.9	2.3	0.6	0.0
Agricultura a Bosques montanos entre 2800-3000	17.9	10.8	20.7	23.9	10.6	26.5	17.6
Agricultura a Bosques montanos entre 3000-3200	9.8	25.2	28.0	32.8	31.3	43.6	20.4
Agricultura a Bosques montanos entre 3200-3400	11.5	15.7	21.2	24.2	32.7	17.8	7.1
Agricultura a Bosques montanos entre 3400-3600	0.3	0.8	0.7	5.3	2.8	1.2	0.5
Agricultura a Pastos entre 2600-2800	133.1	138.5	126.7	80.7	111.1	95.9	93.3
Agricultura a Pastos entre 2800-3000	63.5	79.2	99.5	69.7	92.3	83.4	116.1
Agricultura a Pastos entre 3000-3200	44.7	59.9	117.5	75.2	179.2	124.3	117.3
Agricultura a Pastos entre 3200-3400	72.4	58.5	146.1	135.8	428.0	156.7	184.4
Agricultura a Pastos entre 3400-3600	70.8	76.1	104.9	150.6	563.9	111.9	177.4
Agricultura a Pastos entre 3600-3800	7.9	7.0	26.3	17.6	93.0	12.5	51.9
Agricultura a Pastos entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.5	6.2	6.6	8.3
Agricultura a Matorrales entre 2800-3000	0.2	2.5	1.5	1.9	0.9	2.2	1.0
Agricultura a Matorrales entre 3000-3200	0.9	0.5	0.6	3.4	0.9	0.0	0.0
Agricultura a Matorrales entre 3200-3400	0.3	0.0	0.0	0.7	0.5	0.2	0.0
Agricultura a Plantación forestal entre 2600-2800	0.0	5.5	0.5	1.4	3.5	3.9	9.9
Agricultura a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	1.0	0.6	0.4	13.5	39.2	18.0
Agricultura a Plantación forestal entre 3000-3200	3.9	3.2	14.9	12.9	22.1	39.0	17.5
Agricultura a Plantación forestal entre 3200-3400	2.5	2.9	7.4	14.8	25.4	51.4	14.0
Agricultura a Plantación forestal entre 3400-3600	0.5	0.0	2.6	2.6	38.5	97.1	3.9
Agricultura a Plantación forestal entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	28.4	2.5
Agricultura a Plantación forestal entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
Agricultura a Área urbana entre 2600-2800	46.7	81.1	59.1	176.3	317.1	95.0	567.8
Agricultura a Área urbana entre 2800-3000	4.8	11.7	8.3	14.9	46.7	7.4	57.6

	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Agricultura a Área urbana entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0
Agricultura a Cuerpos de agua entre 3200-3400	0.2	0.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0
Herbazal a Agricultura entre 2600-2800	58.4	45.2	31.7	13.4	31.7	20.5	119.3
Herbazal a Agricultura entre 2800-3000	255.6	304.8	258.0	179.6	370.1	359.9	1081.3
Herbazal a Agricultura entre 3000-3200	649.6	441.5	509.9	383.7	671.6	461.8	1951.1
Herbazal a Agricultura entre 3200-3400	695.3	679.1	614.1	393.1	529.4	496.5	2064.2
Herbazal a Agricultura entre 3400-3600	441.8	362.6	695.7	608.1	700.4	487.4	1773.2
Herbazal a Agricultura entre 3600-3800	45.2	40.2	92.3	41.4	300.3	91.2	286.2
Herbazal a Agricultura entre 3800-4200	11.9	10.9	13.4	17.7	17.8	8.6	22.9
Herbazal a Herbazal entre 2600-2800	90.0	67.3	43.7	42.8	29.3	15.7	14.9
Herbazal a Herbazal entre 2800-3000	1529.8	1300.2	1121.0	1022.9	809.6	547.7	604.7
Herbazal a Herbazal entre 3000-3200	2957.4	2587.1	2231.0	1989.9	1544.9	1225.4	1378.3
Herbazal a Herbazal entre 3200-3400	3739.8	3107.3	2649.4	2448.4	2073.0	1724.0	1857.5
Herbazal a Herbazal entre 3400-3600	5559.8	5219.6	4715.9	4145.9	3305.2	2789.0	3115.6
Herbazal a Herbazal entre 3600-3800	4417.8	4316.0	4105.5	3959.0	3435.4	3269.9	3506.0
Herbazal a Herbazal entre 3800-4200	1678.7	1405.5	1154.6	993.5	1035.9	1039.5	1048.7
Herbazal a Jalca entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Herbazal a Jalca entre 3400-3600	49.9	25.6	34.5	25.7	33.0	6.6	30.5
Herbazal a Jalca entre 3600-3800	39.8	48.5	42.8	30.8	77.3	21.4	46.3
Herbazal a Jalca entre 3800-4200	0.0	0.0	0.1	1.5	0.2	0.0	0.0
Herbazal a Minería entre 2800-3000	0.8	0.0	3.0	12.4	1.2	0.2	5.3
Herbazal a Minería entre 3000-3200	0.1	0.0	0.8	3.5	0.5	0.3	3.2
Herbazal a Minería entre 3400-3600	0.0	0.0	3.2	26.6	88.9	118.2	233.0
Herbazal a Minería entre 3600-3800	0.0	20.1	117.0	145.9	42.5	16.3	304.2
Herbazal a Minería entre 3800-4200	2.3	289.8	275.0	156.5	49.8	20.3	600.0
Herbazal a Bosques montanos entre 2600-2800	0.5	0.6	1.6	0.2	0.4	0.0	0.6
Herbazal a Bosques montanos entre 2800-3000	12.2	4.6	2.3	8.2	3.3	1.4	7.7
Herbazal a Bosques montanos entre 3000-3200	28.8	15.7	13.7	8.1	11.4	9.6	63.6
Herbazal a Bosques montanos entre 3200-3400	34.6	19.7	17.0	29.5	24.3	9.9	46.0
Herbazal a Bosques montanos entre 3400-3600	6.8	6.9	2.0	5.8	7.7	1.5	5.9
Herbazal a Bosques montanos entre 3600-3800	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Herbazal a Pastos entre 2600-2800	0.3	0.4	0.2	0.3	0.6	0.5	2.7
Herbazal a Pastos entre 2800-3000	10.2	10.6	4.2	7.9	24.4	2.0	93.6
Herbazal a Pastos entre 3000-3200	20.6	14.2	23.5	22.5	33.1	15.5	189.1
Herbazal a Pastos entre 3200-3400	63.3	32.2	41.0	32.5	132.4	19.9	443.1
Herbazal a Pastos entre 3400-3600	67.1	52.2	83.5	90.7	274.9	17.6	627.7
Herbazal a Pastos entre 3600-3800	13.2	19.3	17.2	13.1	137.8	14.8	126.4
Herbazal a Pastos entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	0.7
Herbazal a Matorrales entre 2800-3000	3.2	1.4	1.3	0.9	1.0	0.3	2.5
Herbazal a Matorrales entre 3000-3200	7.4	6.5	8.4	5.3	9.1	9.3	12.2
Herbazal a Matorrales entre 3200-3400	8.2	6.2	6.8	5.4	6.8	4.0	8.3
Herbazal a Matorrales entre 3400-3600	1.8	2.0	0.8	1.5	2.9	0.7	3.6
Herbazal a Plantación forestal entre 2600-2800	0.0	4.1	1.5	0.7	0.1	0.2	7.4
Herbazal a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	0.2	1.4	0.3	1.0	0.5	15.1
Herbazal a Plantación forestal entre 3000-3200	5.5	1.0	3.9	9.5	6.9	11.2	71.9
Herbazal a Plantación forestal entre 3200-3400	11.7	7.7	5.6	14.6	26.4	22.1	134.4
Herbazal a Plantación forestal entre 3400-3600	5.3	3.5	4.6	33.9	81.6	105.2	340.7

	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Herbazal a Plantación forestal entre 3800-4200	0.0	0.0	1.3	0.3	17.7	3.6	21.6
Herbazal a Área urbana entre 2600-2800	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	4.2
Herbazal a Área urbana entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.6
Herbazal a Área urbana entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.2	2.3
Herbazal a Cuerpos de agua entre 3200-3400	1.1	2.2	0.4	0.0	0.1	0.0	0.1
Herbazal a Cuerpos de agua entre 3800-4200	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jalca a Agricultura entre 3400-3600	3.4	6.0	21.0	14.0	26.1	9.1	34.9
Jalca a Agricultura entre 3600-3800	0.0	3.3	3.2	0.9	5.4	8.1	8.8
Jalca a Herbazal entre 3400-3600	25.7	53.2	17.4	24.1	10.8	33.5	18.9
Jalca a Herbazal entre 3600-3800	39.2	37.5	43.8	58.1	21.7	62.9	55.2
Jalca a Herbazal entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	0.2	0.0
Jalca a Jalca entre 3400-3600	120.8	111.2	99.9	96.6	88.2	82.3	66.9
Jalca a Jalca entre 3600-3800	123.3	122.2	123.7	107.6	110.4	115.8	93.2
Jalca a Minería entre 3600-3800	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0
Jalca a Bosques montanos entre 3400-3600	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2
Jalca a Pastos entre 3400-3600	0.5	0.0	2.1	1.9	22.1	1.9	26.3
Jalca a Pastos entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.4	5.3
Jalca a Plantación forestal entre 3400-3600	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.4	2.7
Jalca a Plantación forestal entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.2	0.1
Jalca a Plantación forestal entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0
Jalca a Área urbana entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
Minería a Agricultura entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	4.7	2.5
Minería a Agricultura entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.0
Minería a Herbazal entre 2800-3000	1.0	2.0	0.1	1.9	7.7	0.5	0.7
Minería a Herbazal entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	0.0
Minería a Herbazal entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.4	2.1	1.4	0.0
Minería a Herbazal entre 3600-3800	0.0	0.0	4.6	17.2	11.0	5.4	0.0
Minería a Herbazal entre 3800-4200	1.4	0.0	12.0	122.3	27.0	10.9	0.0
Minería a Jalca entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Minería a Minería entre 2800-3000	4.5	3.3	3.2	4.3	10.8	7.4	2.3
Minería a Minería entre 3000-3200	0.1	0.2	0.2	1.0	3.4	3.1	0.1
Minería a Minería entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	2.8	27.4	114.8	0.0
Minería a Minería entre 3600-3800	0.0	0.0	15.5	115.2	250.5	287.8	0.0
Minería a Minería entre 3800-4200	8.6	10.9	328.4	481.3	610.8	649.7	10.0
Bosques montanos a Agricultura entre 2600-2800	14.8	7.0	5.0	6.7	19.8	4.9	41.1
Bosques montanos a Agricultura entre 2800-3000	20.5	44.6	24.4	24.6	46.9	27.5	82.0
Bosques montanos a Agricultura entre 3000-3200	18.9	28.8	27.7	28.1	43.8	23.6	48.8
Bosques montanos a Agricultura entre 3200-3400	19.1	34.4	29.3	34.0	28.0	42.6	73.4
Bosques montanos a Agricultura entre 3400-3600	0.3	0.9	4.9	1.3	3.8	6.9	18.7
Bosques montanos a Herbazal entre 2600-2800	2.3	0.9	0.4	0.7	0.5	0.0	0.0
Bosques montanos a Herbazal entre 2800-3000	8.6	7.0	6.1	2.3	4.5	0.7	1.7
Bosques montanos a Herbazal entre 3000-3200	10.5	11.9	11.3	12.3	9.1	2.8	5.8
Bosques montanos a Herbazal entre 3200-3400	21.7	19.7	21.4	22.1	15.3	8.1	22.9
Bosques montanos a Herbazal entre 3400-3600	9.0	4.8	17.7	2.2	6.1	2.2	9.2
Bosques montanos a Herbazal entre 3600-3800	0.0	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Bosques montanos a Jalca entre 3400-3600	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Bosques montanos a Bosques montanos entre 2800-3000	130.0	108.6	98.2	91.7	72.4	58.2	60.2
Bosques montanos a Bosques montanos entre 3000-3200	200.2	197.2	199.3	199.8	188.3	200.5	171.4
Bosques montanos a Bosques montanos entre 3200-3400	258.5	249.8	232.4	211.7	203.9	198.1	179.1
Bosques montanos a Bosques montanos entre 3400-3600	33.6	35.1	19.7	18.6	16.5	16.4	13.2
Bosques montanos a Bosques montanos entre 3600-3800	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bosques montanos a Pastos entre 2600-2800	1.0	1.1	2.1	0.3	0.4	0.0	0.3
Bosques montanos a Pastos entre 2800-3000	6.3	0.2	0.5	3.0	0.2	0.8	5.9
Bosques montanos a Pastos entre 3000-3200	1.2	1.2	1.6	0.3	0.7	2.2	3.1
Bosques montanos a Pastos entre 3200-3400	7.4	1.3	5.6	3.6	11.7	14.1	28.7
Bosques montanos a Pastos entre 3400-3600	0.0	0.0	0.3	0.0	4.0	0.9	0.3
Bosques montanos a Plantación forestal entre 2600-2800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0
Bosques montanos a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	15.1
Bosques montanos a Plantación forestal entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.6	1.6	2.8	1.8
Bosques montanos a Plantación forestal entre 3200-3400	1.5	0.0	0.0	0.0	10.9	1.4	4.1
Bosques montanos a Plantación forestal entre 3400-3600	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5	0.6	1.4
Bosques montanos a Plantación forestal entre 3600-3800	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bosques montanos a Área urbana entre 2600-2800	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	1.3
Bosques montanos a Área urbana entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
Pastos a Agricultura entre 2600-2800	121.9	175.1	105.2	192.8	167.4	169.4	257.5
Pastos a Agricultura entre 2800-3000	43.9	46.0	29.8	72.0	75.3	95.1	40.4
Pastos a Agricultura entre 3000-3200	35.5	38.9	45.2	87.8	64.1	141.3	35.3
Pastos a Agricultura entre 3200-3400	33.5	76.7	51.1	134.6	53.4	271.6	30.7
Pastos a Agricultura entre 3400-3600	29.4	40.1	75.6	130.9	45.2	392.4	17.4
Pastos a Agricultura entre 3600-3800	0.8	4.3	11.3	24.8	2.6	79.1	1.7
Pastos a Agricultura entre 3800-4200	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0
Pastos a Herbazal entre 2600-2800	0.0	0.5	0.5	0.3	0.0	0.2	0.0
Pastos a Herbazal entre 2800-3000	1.4	2.5	1.3	3.9	0.8	4.2	2.6
Pastos a Herbazal entre 3000-3200	9.7	6.6	7.7	7.7	6.9	7.7	2.4
Pastos a Herbazal entre 3200-3400	11.0	29.1	11.9	9.8	10.2	26.2	0.5
Pastos a Herbazal entre 3400-3600	10.8	31.0	21.9	28.1	3.8	54.5	0.8
Pastos a Herbazal entre 3600-3800	0.1	4.3	6.2	7.0	3.9	54.8	1.3
Pastos a Herbazal entre 3800-4200	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.1
Pastos a Jalca entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
Pastos a Jalca entre 3400-3600	0.0	0.6	0.0	4.8	0.0	2.8	0.0
Pastos a Jalca entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
Pastos a Bosques montanos entre 2600-2800	1.9	1.2	0.5	0.5	0.0	0.1	0.2
Pastos a Bosques montanos entre 2800-3000	0.5	5.2	0.4	0.5	1.3	0.5	1.1
Pastos a Bosques montanos entre 3000-3200	0.3	1.8	0.2	2.9	0.8	0.9	0.2
Pastos a Bosques montanos entre 3200-3400	0.6	3.5	0.8	4.3	3.4	4.5	0.3
Pastos a Bosques montanos entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
Pastos a Pastos entre 2600-2800	1798.6	1733.0	1754.3	1664.8	1527.3	1464.5	1469.4
Pastos a Pastos entre 2800-3000	130.1	156.6	215.2	243.5	247.5	264.0	131.7
Pastos a Pastos entre 3000-3200	80.0	99.3	121.4	165.3	192.4	255.9	87.3
Pastos a Pastos entre 3200-3400	82.4	116.1	144.3	188.3	292.4	561.2	96.1
Pastos a Pastos entre 3400-3600	134.6	201.4	232.3	259.3	452.4	853.0	156.2
Pastos a Pastos entre 3600-3800	11.1	23.6	32.3	43.9	68.1	163.3	9.0
Pastos a Pastos entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.7	0.5

	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Pastos a Matorrales entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
Pastos a Plantación forestal entre 2600-2800	0.0	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.5
Pastos a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Pastos a Plantación forestal entre 3000-3200	0.1	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5	0.4
Pastos a Plantación forestal entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.6	0.0
Pastos a Plantación forestal entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	14.8	0.5
Pastos a Plantación forestal entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0
Pastos a Área urbana entre 2600-2800	4.2	25.8	13.7	30.1	52.7	6.8	199.0
Pastos a Cuerpos de agua entre 3200-3400	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Matorrales a Agricultura entre 2800-3000	4.3	3.5	3.7	2.8	4.0	3.7	11.5
Matorrales a Agricultura entre 3000-3200	0.7	0.7	3.8	0.9	0.9	13.1	14.7
Matorrales a Agricultura entre 3200-3400	0.0	0.1	0.9	0.1	0.7	8.0	8.2
Matorrales a Agricultura entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
Matorrales a Herbazal entre 2800-3000	1.3	1.3	0.7	2.7	0.7	1.4	2.3
Matorrales a Herbazal entre 3000-3200	6.0	7.4	7.7	12.6	8.0	4.0	10.4
Matorrales a Herbazal entre 3200-3400	8.7	9.7	8.1	5.3	3.7	3.9	11.1
Matorrales a Herbazal entre 3400-3600	1.5	0.7	1.3	1.4	0.1	1.1	0.3
Matorrales a Pastos entre 2800-3000	0.2	0.0	0.4	1.2	0.7	0.2	3.1
Matorrales a Pastos entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	1.1	1.9
Matorrales a Matorrales entre 2800-3000	38.2	36.8	35.9	32.0	29.1	25.9	26.1
Matorrales a Matorrales entre 3000-3200	120.3	120.5	116.0	111.0	109.1	101.0	98.9
Matorrales a Matorrales entre 3200-3400	77.1	75.8	73.0	74.3	76.1	69.3	65.2
Matorrales a Matorrales entre 3400-3600	5.6	6.7	7.4	6.7	8.1	9.7	6.8
Matorrales a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.9
Matorrales a Plantación forestal entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.2
Matorrales a Plantación forestal entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.4
Plantación forestal a Agricultura entre 2600-2800	0.0	0.0	1.2	1.9	3.2	1.4	0.0
Plantación forestal a Agricultura entre 2800-3000	0.0	0.0	0.2	1.1	0.0	7.9	0.0
Plantación forestal a Agricultura entre 3000-3200	0.4	3.9	2.3	7.7	6.8	18.5	1.7
Plantación forestal a Agricultura entre 3200-3400	0.0	2.0	2.8	1.4	7.7	12.7	0.6
Plantación forestal a Agricultura entre 3400-3600	0.0	1.2	0.4	0.6	1.3	10.6	0.0
Plantación forestal a Agricultura entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	7.3	0.0
Plantación forestal a Agricultura entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 2800-3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 3000-3200	0.0	0.5	0.3	1.5	4.3	1.4	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 3200-3400	0.0	1.4	2.9	11.0	8.0	3.9	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 3400-3600	0.0	0.5	0.5	2.6	9.1	13.8	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 3600-3800	0.0	0.7	12.8	14.3	7.8	12.5	0.0
Plantación forestal a Herbazal entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.4	0.0
Plantación forestal a Jalca entre 3400-3600	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
Plantación forestal a Jalca entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0
Plantación forestal a Minería entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0
Plantación forestal a Bosques montanos entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
Plantación forestal a Bosques montanos entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0
Plantación forestal a Bosques montanos entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	1.3	0.1	0.4	0.0
Plantación forestal a Pastos entre 2600-2800	0.0	0.0	0.4	0.2	0.5	0.0	0.0
Plantación forestal a Pastos entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.7	1.0

	1987- 1991	1991- 1996	1996- 2000	2000- 2007	2007- 2013	2013- 2016	1987- 2016
Plantación forestal a Pastos entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.5	0.0
Plantación forestal a Pastos entre 3600-3800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
Plantación forestal a Pastos entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Plantación forestal a Matorrales entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 2600-2800	0.0	0.0	8.1	8.2	7.2	9.4	0.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 2800-3000	0.0	0.0	1.0	2.0	1.9	9.2	0.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 3000-3200	4.3	9.5	11.1	19.6	31.1	41.3	2.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 3200-3400	0.9	13.3	18.2	18.7	31.3	75.7	0.3
Plantación forestal a Plantación forestal entre 3400-3600	0.0	4.1	7.4	10.2	36.5	131.0	0.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 3600-3800	0.0	20.7	29.8	30.0	30.9	157.1	0.0
Plantación forestal a Plantación forestal entre 3800-4200	0.0	0.0	0.0	1.1	1.3	18.0	0.0
Área urbana a Agricultura entre 2600-2800	15.4	11.5	20.6	7.5	13.5	54.0	1.5
Área urbana a Agricultura entre 2800-3000	3.5	0.7	5.0	1.1	3.8	20.9	0.3
Área urbana a Agricultura entre 3000-3200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0
Área urbana a Herbazal entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0
Área urbana a Pastos entre 2600-2800	2.6	1.4	5.4	1.2	1.2	5.0	0.0
Área urbana a Área urbana entre 2600-2800	389.6	427.7	508.6	572.8	764.9	1076.2	406.1
Área urbana a Área urbana entre 2800-3000	22.9	26.9	33.6	40.8	51.8	77.7	26.1
Área urbana a Área urbana entre 3400-3600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0
Cuerpos de agua a Agricultura entre 3200-3400	0.0	0.5	0.4	0.3	1.0	2.0	1.3
Cuerpos de agua a Agricultura entre 3800-4200	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cuerpos de agua a Herbazal entre 3200-3400	0.0	0.0	0.0	1.1	0.6	0.4	0.3
Cuerpos de agua a Herbazal entre 3800-4200	0.7	1.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Cuerpos de agua a Minería entre 3800-4200	0.0	2.3	0.2	0.0	0.0	0.0	5.0
Cuerpos de agua a Cuerpos de agua entre 3200-3400	6.8	7.7	9.5	9.1	7.6	5.3	5.2
Cuerpos de agua a Cuerpos de agua entre 3800-4200	4.1	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0